

**Standortspezifische Entwicklung von Buchenwaldgesellschaften im
nordostdeutschen Tiefland, dargestellt am Beispiel des Melzower
Buchennaturwaldes**

D i s s e r t a t i o n
zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum agriculturarum
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der
Lebenswissenschaftlichen Fakultät der
Humboldt-Universität zu Berlin

von
Dipl.-Forstingenieur (FH), Dipl.-Kriminalist Olaf Rüffer

Präsidentin
der Humboldt-Universität zu Berlin
Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. Sabine Kunst

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät
Herr Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter

1. Prof. Dr. habil. R. Kätzel
2. Prof. Dr. habil. C. Ammer
3. Prof. Dr. A. Bolte

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.2018



Abb. 0-1: Totholz im Faulen Ort
Pastellzeichnung von Hans-Ulrich Finger

Danksagung

Die vorliegende Arbeit hätte ohne das Wirken der Nachkriegsgeneration Eberswalder Forstwissenschaftler, die vorausschauend in den 1950er Jahren begannen Versuchsflächen in der ehemaligen DDR zur Erkundung der Potentiell Natürlichen Vegetation in naturnahen Waldgebieten anzulegen, nicht geschrieben werden können. Deshalb sei an dieser Stelle, stellvertretend für sie, Herrn Professor Dr. habil. G. Hofmann und Herrn Dr. K.-H. Großer (†), beide als junge Assistenten unter Professor Scamoni und Dr. Franz mit der Auswahl von geeigneten Flächen beauftragt und nachfolgend über Jahrzehnte in unterschiedlichen Positionen ihr Leben lang mit der ostdeutschen Waldkundeforschung verbunden, sehr herzlich gedankt. Ich hatte das Glück, beide kurz vor ihrer Pensionierung als erfahrene Dozenten an der HNEE zu hören und sie später, in den nunmehr 20 Jahren der beruflichen Beschäftigung mit der Naturwaldforschung, als ausgewiesene Experten immer wieder konsultieren zu können. Professor Dr. habil. G. Hofmann war mir als Ansprechpartner zu standörtlich-vegetationskundlichen Fragestellungen dieser Arbeit ein wertvoller Ratgeber. Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei den Erstbearbeitern der Untersuchungsflächen, Herrn Dipl.-Forsting. D. Holzkamm und Herrn Dr. K. H. Mansik (†), für die qualitativ gute Dokumentation ihrer Arbeiten.

Für das Wecken meines Interesses für standörtlich-bodenkundliche Fragestellungen gilt dem „Vater“ meiner zweiten Diplomarbeit, Herrn Professor Dr. habil. D. Heinsdorf, Dank. Vertiefende praktische Kenntnisse im Umgang mit modernen elektronischen Vermessungsgeräten und in der Auswertung von (analogen) Stereo-Luftbildern, deren Grundlagen ich bei Professor Dr. Dr.-Ing. W. Perlwitz hörte und der mich auch nach dem Studium als Assistent für studentische Vermessungsübungen förderte, haben es mir gestattet, die stillgelegten, ungekennzeichneten und nicht georeferenzierten Flächen nach fast 50 Jahren im Wald wiederzufinden. Ausschlaggebend hierfür war, neben einem Quäntchen Glück, die Möglichkeit, das Felddatenerfassungs-, Vermessungs- und Visualisierungssystem Field-Map in Tschechien kennenlernen, erwerben und nutzen zu können. Diese Technik gestattete mir eine bislang unbekannte Qualität in der georeferenzierten Versuchsflächenarbeit. Für die diesbezügliche großzügige persönliche Förderung und ihr Vertrauen in meine Arbeit, die sprichwörtliche „lange Leine“, gilt meinen damaligen Leitern, Herrn Professor Dr. K. Höppner und Prof. Dr. habil. R. Kätzel mein aufrichtiger Dank.

Die praktische Bearbeitung der Untersuchungsflächen im Faulen Ort erfolgte mit Hilfe, Unterstützung sowie fachlichem Rat einer Vielzahl von Kollegen der ehemaligen Landesforstanstalt Eberswalde. Ihnen allen möchte ich dafür danken: Dies betrifft zunächst meine unmittelbaren Arbeitskollegen aus dem Sachgebiet Naturwaldforschung, Frau Dipl.-Forsting. (FH) I. Höhne, insbesondere für die Unterstützung bei forsthistorischen Recherchen, und Herrn Dipl.-Forsting. S. Schmidt sowie Herrn Dr. habil. M. Noack für fachliche Diskussionen und praktische Hilfe bei Außendienstarbeiten. Bei den umfangreichen Einmessarbeiten halfen außerdem Frau Dipl.-Forsting. K. Kessler sowie Herr B. Eisermann. Die bodenkundlichen Arbeiten an den beiden Altprofilen erfolgten unter Anleitung von Dr. B. Strohbach und Dipl.-Forsting. (FH) U. Finger. Letzterem danke ich auch für die Überlassung seiner umseitigen Pastellzeichnung. Die SEA-95-konforme Einstufung der erhobenen Alt-Profildaten wurde im Beisein des leitenden Standortserkundler FOR M. Grüll durchgeführt. Dr. J. Hannemann stand mir bei der Kalktiefermittlung sowie den Totholzbeprobungen zur Seite. Herr Dr. Kallweit weihte mich in die Geheimnisse der praktischen hemisphärischen Fotografie ein und unterstützte mich mit fachlichem Rat bei der

Erarbeitung des diesbezüglichen Fachkapitels dieser Arbeit. Herr Dr. habil. J. Schröder ermittelte die Radialzuwächse und das Alter an den von mir gewonnenen Bohrspänen der Alt-Buchen. Dipl.-Forsting. (FH) F. Becker war mir eine große Hilfe bei der genetischen Beprobung der Buchen und Linden. Mein besonderer Dank gilt meinem befreundeten Studienkollegen, Herrn Dipl.-Forsting. (FH) U. Pommer, Waldkundeinstitut Eberswalde, für seine wiederholte uneigennützig, fachlich kompetente Unterstützung bei der flächigen Vegetationskartierung der Untersuchungsflächen. Per Werkvertrag analysierte Frau Dr. B. Fussi, Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenanzucht, die Buchen- und Lindungenproben. Dem Zentralen Ökologischen Labor der HNEE unter Leitung von Herrn Professor Dr. F. Gutwasser möchte ich für die gewissenhaften Laboranalysen danken. Sowohl Frau Dr. A. Degenhardt (LFE) als auch Frau Dipl.-Mathematikerin Katja Köhler (DLR Berlin-Adlershof) beantworteten bereitwillig mathematisch-statistische Fragen.

Stellvertretend für die Kollegen aus dem Arbeitskreis der Forstlichen Fernerkunder der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AFFEL) möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Forsting. (FH) K. Jütte (LaFoA Schwerin) für die fachliche Anleitung beim Erlernen der modernen Luftbild- sowie Laserauswerte- und -analysetechniken bedanken. Herr Dipl.-Ing. und Markscheider W. Aleithe (Glückauf Vermessung Bautzen) machte mich mit der modernen russischen Software Agisoft Photoscan Professional vertraut, die es mir sehr effizient gestattete, aus historischen Luftbildern ein Stereomodell sowie nachfolgend ein Oberflächenmodell zu generieren. Die für die Field-Map Feldarbeit und die weitere Auswertung der Fernerkundungsdaten notwendigen GIS-Kenntnisse verdanke ich neben dem Kursbesuch bei Frau Professor T. Lakes (HUB, Sektion Geografie) dem fachlichen Austausch mit den Kollegen Dipl.-Ing. T. Hass und Dipl.-Forsting. (FH) F. Becker (ehemalige GIS-Arbeitsgruppe des LFE). Dr. M. Körner („INTERREG IV A“-Projekt) stellte mir die first pulse Laserrohdaten für die Untersuchungsflächen zur Verfügung.

Bei Herrn Prof. Dr. sc. jur. F.-R. Schurich, dem „Vater“ meiner ersten Diplomarbeit, erster im Herbst 1989 von den Studenten und dem Lehrkörper gewählter Direktor der Sektion Kriminalistik, möchte ich mich stellvertretend für die Ausbildung in naturwissenschaftlichen, sozialwissenschaftlichen und philosophischen Grundlagen und für die Lehre des kriminalistischen, problemlösenden Denkens bedanken. Die damals für den kriminalistischen Erkenntnisprozess gelehrt philosophischen Kategorien, wie z. B. *Wesen* und *Erscheinung* und *Raum* und *Zeit*, in der Ökosystemforschung angewandt, halfen mir sehr bei der Bewertung der beobachteten Erscheinungen und erlaubten mir eine ganzheitliche Sicht auf die Naturwaldentwicklung.

Für den fachlichen Rat beim Niederschreiben dieser Arbeit sage ich ganz herzlich Dank Herrn Professor Dr. habil. R. Kätzel sowie für die Unterstützung bei der Layout-Gestaltung meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dipl.-Forstingenieur und (ehemaligen) Lektor im Tourist Verlag Christian Naffin. Für Hinweise und bereitgestellter Literatur möchte ich mich bei Frau Professor Dr. B. Wolff (HNEE), Herrn Professor Dr. A. Bolte (Thünen-Institut) sowie bei Dr. Gernod Bilke (Landesbetrieb Forst Brandenburg) bedanken.

In den fünf Jahren meines Studiums als externer Promotionsstudent der HUB waren mir meine Frau Kathleen, meine Eltern Marga und Dieter Rüffer sowie meine Schwiegermutter Doris Böttcher, eine große Stütze. Durch ihre Hilfe bei der Betreuung unserer fünfjährigen Tochter Helene und meines Sohnes Robert, ihre Geduld und ihr Verständnis haben sie mir sprichwörtlich den Rücken für das Studium freigehalten und dazu beigetragen, dass ich bis zum Schluss durchhielt. Meinem Bruder Uwe danke ich für die Möglichkeit des regelmäßigen Gedankenaustausches in dieser arbeitsreichen Zeit der letzten Jahre.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielstellung und Prüfhypothesen	2
2.	Untersuchungsgebiet	5
2.1	Topografische Lage und standortsökologische Charakteristika des waldökologischen Wuchsräume	5
2.1.1	Geologie, Böden und Relief	6
2.1.2	Klima	8
2.1.3	Deposition	11
2.1.4	Die Potentielle Natürliche Vegetation	13
2.2	Forstnutzungsgeschichte des Waldgebietes	14
2.2.1	Kurzer Abriss der vegetations-, standorts- und waldwachstumskundlichen Forschungsarbeiten im Waldschutzgebiet <i>Fauler Ort</i>	15
3.	Methodik	16
3.1	Forschungsansatz	16
3.2	Primärdatenerhebung	17
3.2.1	Historische Versuchsflächeneinrichtung und Datengrundlagen	17
3.2.2	Georeferenzierte Bestockungsstrukturerfassung	18
3.2.2.1	Luftbildrecherche, -analyse und -auswertung	19
3.2.3	Standortsökologische Untersuchungen	20
3.2.3.1	Ermittlung der Kalktiefen	21
3.2.3.2	Bestimmung des pH _{-KCl} Wertes, Gesamtstickstoffs und Gesamtkohlenstoffs des Oberbodens	22
3.2.3.3	Untersuchungen am liegenden Totholz	22
3.2.4	Vegetationsökologische Untersuchungen	25
3.2.5	Populationsgenetische Untersuchungen	27
3.2.6	Dendrochronologische Untersuchungen des Altbestandes	29
3.2.7	Schätzung der Strahlungsverhältnisse	29
3.3.	Primärdatenauswertung (räumliche, geostatistische und statistische Analyseverfahren)	30
3.3.1	Räumliche Analyseverfahren	30
3.3.2	Geostatistische Auswerteverfahren	31
3.3.3.	Statistische Auswerteverfahren	31
4.	Ergebnisse und Diskussion	32
4.1	Kartierung der Stammeigenschaften der Böden – Bestimmung der Kalktiefen	32
4.2	Waldkundliche Aufnahmen von Bestandesstruktur und Vegetation	34

4.2.1	Rekonstruktion des historischen Waldzustandes (1958 und 1968)	34
4.2.1.1	Überschirmungsgrad und Vegetationshöhenmodell zum Zeitpunkt der Erstinventur	37
4.2.1.2	Vegetationsverhältnisse zum Zeitpunkt der Erstaufnahme	41
4.2.2	Waldkundliche Aufnahme der Flächen in der Wiederholungsinventur 2012	43
4.2.2.1	Vergleichende Analysen des Höhenwachstums der Buche	51
4.2.3	Auswertung der Luftbildzeitreihe 1960 bis 2012	55
4.2.4	Validierung der Bestandesgeschichte durch dendrochronologische Untersuchungen an Buchenüberhältern.....	60
4.2.5	Vergleichende Analysen der Stammzahldichten von Erst- und Wiederholungsinventur	63
4.2.6	Vegetationskundliche Untersuchungsergebnisse der Wiederholungsinventur	67
4.2.6.1	Flächige Vegetationskartierung mit Ausscheidung soziologischer Artengruppenkombinationen	67
4.2.6.2	Ergebnisse der Vegetationsanalyse der Parzellen <i>Kuppe, Hang</i> und <i>Senke</i>	74
4.2.6.3	Ergebnisse des Methodenvergleichs zur indirekten Ermittlung der in den Flächen <i>Kuppe, Hang</i> und <i>Senke</i> vorhandenen kleinklimatischen Temperatur- und Feuchteunterschiede	75
4.2.7	Binär logistische Regression	82
4.2.7.1	Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Kühlezeiger Buche und Berg-Ahorn	82
4.2.7.2	Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Wärmezeiger Sommer- und Winter-Linde	86
4.2.8	Zusammenfassende Diskussion der Bestockungsveränderungen	89
4.3	Bodenkundliche Ergebnisse	94
4.3.1	Vergleich der Vegetationsanalyse mit den bodenkundlichen Ergebnissen	94
4.3.2	Vergleich der ermittelten Kalktiefen mit dem pH _{KCl} -Wert des Oberbodens	98
4.3.3	Zuordnung der bodenkundlichen Ergebnisse zu den festgestellten Waldökosystemen	99
4.4	Untersuchungsergebnisse am liegenden Totholz	105
4.4.1	Einzelbaumweise Bilanzierung der Makroelemente Kohlenstoff und Stickstoff .	105
4.4.2	Auswirkungen der flächigen Kohlenstoff- und Stickstofffreisetzungen auf den Oberboden der Tiefenstufe 0–5 cm der drei Untersuchungsflächen.....	107
4.4.3	Aktuelle kleinräumige Auswirkungen der einzelbaumbezogenen Kohlenstoff- und Stickstofffreisetzung auf den Oberboden	109
4.4.4	Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse und der Untersuchungen am liegenden Totholz	118
4.5	Schätzung der Strahlungsverhältnisse mittels hemisphärischer Fotos	123
4.5.1	Strahlungssituation im strahlungsreichen Frühjahr	123
4.5.1.1	Vergleich der Strahlungsverhältnisse in den etablierten Waldökosystemen	123

4.5.1.2	Vergleich der Strahlungsverhältnisse zwischen den Höhen- bzw. Wuchsklassen	124
4.5.2	Strahlungssituation im Sommerhalbjahr	129
4.5.2.1	Vergleich der Strahlungsverhältnisse in den etablierten Waldökosystemen	129
4.5.2.2	Vergleich der Strahlungsverhältnisse zwischen den Höhen- und Wuchsklassen	131
4.5.3	Zusammenfassende Diskussion der Strahlungsschätzung	136
4.6	Baumartenspezifische genetische Untersuchungsergebnisse	141
4.6.1	Genetische Untersuchungen Buche	141
4.6.1.1	Genetische Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen	141
4.6.1.2	Genetische Unterschiede zwischen den Durchmesserklassen	141
4.6.1.3	Analyse seltener und privater Allele an den 10 Mikrosatellitenorten	145
4.6.2	Genetische Untersuchungen an Sommer- und Winter-Linde	147
4.6.2.1	Genetische Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen	149
4.6.2.2	Genetische Unterschiede zwischen den Durchmesserklassen	150
4.6.2.3	Vegetative Vermehrung	151
4.6.2.4	Analyse des Vorkommens seltener und privater Allele	153
4.6.3	Diskussion zu den genetischen Analysen	156
5.	Übergreifende Diskussion	160
6.	Zusammenfassung	181
7.	Abstract	186
8.	Literaturverzeichnis	187
	Erklärung des Promovenden	198
9.	Anlagen	199
9.1	Abbildungsverzeichnis	199
9.2	Tabellenverzeichnis	200
9.3	Abkürzungsverzeichnis	202
9.4	Anlagen Ergebnisteil	204

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Natürliche, von der Buche (*Fagus sylvatica*) in der Baumschicht geprägte Wälder, nachfolgend als Buchenwälder bezeichnet, haben weltweit ein sehr kleines Verbreitungsgebiet, das sich auf den mittel-, ost- und südeuropäischen Raum beschränkt und in dessen Zentrum Deutschland liegt (BOHN & WEBER 2000). Das natürliche Areal der Buchenwälder in Europa umfasst etwa 95 Mio. Hektar (BOHN ET AL. 2000; zit. nach KNAPP 2008, 15).

Der Anteil Deutschlands an der potentiell natürlichen Gesamtfläche der europäischen Buchenwälder (planare, colline, submontane, montane Buchenwälder) in ihren standortbedingten Ausprägungen beträgt etwa 25 %. Etwa ein Drittel dieser Waldfläche würden die Tieflandbuchenwälder (planare Buchenwälder) einnehmen. Demgegenüber steht der sehr geringe aktuelle Anteil der Buchenwälder in Deutschland. Durch Waldrodung und Baumartenwechsel wurde er auf 1,56 Mio. Hektar, etwa 4,5 % seines ursprünglichen Standortpotentials zurückgedrängt (KNAPP 2008, 16). Gerade die Tieflandbuchenwälder auf den fruchtbaren Moränenstandorten im norddeutschen Tiefland sind schon sehr früh als bevorzugtes Siedlungsgebiet durch Rodung massiv in Acker- und Bauland umgewandelt worden. Die aktuellen rezenten Buchenwald-Vorkommen im nordostdeutschen Tiefland (Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg) mit ca. 90.000 Hektar Fläche nehmen etwa ein Fünftel bis ein Sechstel des verbliebenen Weltbestandes dieses Waldtyps ein (WINTER ET AL 2003, 10). Angesichts dieser Verantwortung gehört die Erhaltung der Tieflandbuchenwälder zu einem wichtigen Ziel sowohl des Naturschutzes als auch der Forstwirtschaft in Deutschland. Dabei verfolgen beide Ressorts unterschiedliche Strategien, die in den letzten 10–15 Jahren in teilweise kontrovers geführten Diskussionen und politischen Grundsatzserklärungen mündeten.

Während der Naturschutz die Erhaltung der Buchenwälder durch eine expansive Unterschutzstellung vorhandener (Alt)-Buchenwälder als *hotspots* der Biodiversität erreichen möchte, verfolgen die Landesforstverwaltungen Deutschlands mit einem in die naturnahe Waldwirtschaft integrierten Netz von Schutzgebieten unterschiedlicher Beschränkungsintensität ein integratives Konzept, das sowohl die Bewirtschaftung als auch den Nutzungsverzicht, beispielsweise in den Naturwäldern, zulässt.

Für die Entwicklung naturnaher Waldbaurichtlinien fehlen beiden Strategien jedoch die wissenschaftlichen Grundlagen über die langfristigen natürlichen Prozesse der (langfristigen) Waldentwicklung in Buchenwäldern. Die Ursachen hierfür liegen zum einen im frühzeitigen Verlust der planaren Buchenurwälder in Mitteleuropa. Zum anderen erschwert die Langlebigkeit (im Vergleich zu menschlichen Zeitvorstellungen) der in naturnahen Wäldern ablaufenden Prozesse deren Beobachtung. In den aus der forstlichen Nutzung entlassenen Naturwäldern sind die stattfindenden Veränderungen durch die nur wenige Jahre zurückliegenden Bewirtschaftungsmaßnahmen noch immer forstlich überprägt.

Die heutigen Hypothesen über die in planaren Buchenwäldern ablaufenden natürlichen Prozesse basieren entweder auf echten und unechten Zeitreihenanalysen colliner und montaner Buchenurwäldern der Slowakei, Sloweniens, Rumäniens, Tschechiens, der Ukraine und Albaniens (KORPEL 1992, 1148 ff.; KORPEL 1995; KORPEL 1997, 619 ff.; LEIBUNDGUT 1959, 900 ff.; LEIBUNDGUT 1993; MAYER ET AL. 1989; MLINSEK 1978, 684 ff.; PINTARIC 1978, 702 ff.; PRUSA 1985; TABAKU 1999; DRÖBLER 2006) oder aus (ersten) unmittelbaren Beobachtungen und Messungen in aus der forstlichen Nutzung entlassenen

Buchennaturwäldern Deutschlands, die in theoretischen Denkansätzen in verbalen und formalisierten Modellen zusammengefasst wurden.

Dabei wird von einem Teil der Autoren anhand von Langzeitsimulationen erster unechter Zeitreihenanalysen in planaren Buchennaturwäldern angenommen, dass sich plenterwaldartige Raumstrukturen mit einer starken Alters- und Höhengliederung, einem hohen stabilen Totholzvorrat, hoher Strukturvielfalt und ständiger Verjüngung auf kleinster Fläche auch in Tieflandbuchenwäldern in Anlehnung an die Studien aus den collinen bzw. montanen Buchenurwäldern im Laufe der Zeit quasi als Annäherung an den „Naturzustand“ herausbilden werden (RADEMACHER ET AL. 2001, 289 ff.; WINTER ET AL. 2003).

Andere Autoren weisen diese theoretischen Vorstellungen einer plenterwaldartigen Waldstruktur von Tieflandbuchenwäldern als realitätsfern zurück und betonen das Vorhandensein von mehr oder weniger homogenen, gleichschichtigen und gleichaltrigen Phasen auf ausgedehnten Flächen im planaren Buchennaturwald als Beleg dafür, dass Zustand und Dynamik von Naturwäldern weniger von einer inneren Sukzessionskontrolle als von der Wirkung häufig auftretender äußerer Störungen bestimmt wird (VAN MIGROET 1996, 49 ff.).

Einen dritten ökosystemaren Modellansatz, der durch umfangreiche Beobachtungen in Tieflandbuchenwäldern Mecklenburgs und Brandenburgs in Form unechter Zeitreihen am Beispiel des natürlichen Entwicklungszyklusses des baltischen Perlgras-Buchenwaldes beschrieben wurde, unterbreiten JENSSEN & HOFMANN (1996). Sie kommen zu dem Schluss, *„dass natürliche Wälder sich selbstorganisierte und evolvierende Ökosysteme [sind, Anm. d. Verf.], die weder irgendwelchen hypothetischen Endzuständen von Vegetation und Standort zustreben, noch in der Hauptsache von außen durch zufällige Störungen gesteuert werden“* und fordern, dass Modellvorstellungen zur natürlichen Waldentwicklung im konkreten Bezug von Standort und Vegetation entwickelt werden müssen (JENSSEN & HOFMANN 1996, 116).

1.2 Zielstellung und Prüfhypothesen

Mit der Untersuchung des Verjüngungszyklusses des Tieflandbuchenwaldes sollen praktische Hinweise für ein naturnahes, standortgerechtes Wirtschaften in Tiefland-Buchenwäldern gegeben werden. Diese sollen einen Beitrag zur Entwicklung standortgerechter Naturverjüngungsverfahren in Tieflandbuchenwäldern leisten, der objektiveren Einschätzung der Naturnähe heutiger Tieflandbuchenwälder dienen und eine differenzierte Bewertung zwischen tatsächlicher natürlicher Entwicklung und forstwirtschaftlicher Einflussnahme auf den heutigen Entwicklungszustand von Rotbuchenwäldern ermöglichen.

Durch die vergleichende Analyse von Waldzuständen, als Ausgangspunkt dient das Altbaum-Hallenstadium, mit dem 54 Jahre später vorgefundenen Jungbaum- oder Stangenholzstadium und beginnendes Baum-Hallenstadium des neuen Waldzyklusses (JENSSEN & HOFMANN 1996, 114 ff.), soll am Beispiel des *Melzower Buchennaturwaldes* folgenden Fragen nachgegangen werden:

1. Unter welchen ökosystemaren Rahmenbedingungen und in welchen räumlichen und zeitlichen Strukturen verjüngt sich der Tieflandbuchenwald?
2. Wie verlaufen die Verjüngungsprozesse der Waldentwicklung und welche weiteren (seltenen) Mischbaumarten sind daran standortspezifisch beteiligt?

3. Welche waldbaulichen Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen ergeben sich aus der Beobachtung natürlicher Waldentwicklungsprozesse für die naturnahe Bewirtschaftung des Tieflandbuchenwaldes, die gleichzeitig naturschutzfachlichen Zielen gerecht werden?

Als Hypothesen sollen geprüft werden:

1. Die Verjüngung erfolgt in der Regel nicht einzelstammweise, sondern in Gruppenstrukturen, die eine Tendenz zu kleinflächigen, mehr oder weniger gleich alten Einartbeständen mit genetisch ähnlichen Familienstrukturen aufweisen.
2. Ein entstehender neuer Zyklus ist in seiner Baumartenzusammensetzung und Systemstruktur standörtlich differenziert.
3. Moderne Methoden der Geoinformatik (dreidimensionale Vermessung des Baumbestandes und der Vegetation, Interpretation von Luftbildzeitreihen, Berechnung von Vegetationshöhenmodellen aus Luftbildzeitreihen, Nutzung von digitalen Geländemodellen, Darstellung und Analyse dieser in Geografischen Informationssystemen, Ableitung mathematischer Modelle) erlauben es, die im Regenerations- bzw. Formierungsprozess des Buchenmischwaldes ablaufenden Prozesse in ihrer Vielfalt hinreichend zu erfassen, zu rekonstruieren, zu analysieren und auf dieser Grundlage auch Entwicklungsprognosen zu formulieren.
4. Der Tieflandbuchenwald verjüngt sich in seinem Entwicklungszyklus nicht kontinuierlich, sondern ist auf bestimmte Phasen dem Disintegrations- und Formierungsstadium beschränkt (JENSSEN & HOFMANN 1996, 114 ff.).
5. Nur die in dieser Entwicklungsphase der Tieflandbuchenwälder einsetzende Verjüngungstätigkeit bietet die Möglichkeit der Etablierung eines neuen, an veränderte Standort- und hier speziell Klimabedingungen angepassten Lebenszyklus` des Buchenwaldes. Die Gruppen-Anfangsphase des neuen Zyklus` wird durch intraspezifische Konkurrenzbeziehungen (weniger durch interspezifische) dominiert, in der sich in der Gruppe die vitalsten Exemplare durchsetzen, bevor sie in die interspezifische Auseinandersetzung um die Dauerphasenstruktur einwachsen. Diese anfangs homogenen Gruppenstrukturen, mit denen auch seltene Baumarten aufwachsen (so beispielsweise Elsbeere, Sommer-Linde, Feld-Ahorn), bieten diesen die Möglichkeit der Einwanderung und Etablierung in solche Waldgesellschaften, in denen zur Massenbildung neigende Baumarten (Buche, teils auch Hainbuche) die Waldstruktur dominieren.
6. Die Vielfalt der Erscheinungsformen des Naturwaldes (z. B. Sonderstrukturen, Totholzangebot, Schichtigkeit, Verjüngungsdynamik, Vegetationszusammensetzung) unterliegen einer natürlichen Dynamik, sie sind nur durch die genaue Kenntnis des Bio- und Geopotentials, wie der daraus ableitbaren potentiellen natürlichen Waldgesellschaft als Ausdruck des gesamten Standortpotentials und der Wald- bzw. Forstwirtschaftsgeschichte (als Startpunkt der Waldentwicklung) zu verstehen und zu bewerten.
7. Das Studium der natürlichen Verjüngungsabläufe liefert Beispiele und wird Ratgeber für eine standortgerechte und zugleich naturnahe Waldbewirtschaftung, die Naturschutzanliegen integriert, wie zum Beispiel die ökologisch fundierten Gruppenwiedereinbürgerung von seltenen Baumarten wie Elsbeere, Sommer-Linde,

Feld-Ahorn, Berg-Ulme in entsprechende Waldentwicklungsstadien des Buchenmischwaldes.

Die gewonnenen Befunde bieten die Möglichkeit der Eichung von Naturschutzstandards, so beispielsweise der Bewertung von Erhaltungszuständen von Buchen-FFH-Lebensraumtypen.

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Lage und Standortverhältnisse

Der *Melzower Buchennaturwald*, hervorgegangen aus dem ehemaligen Waldschutzgebiet *Fauler Ort*, liegt etwa 100 km nordöstlich der Bundeshauptstadt Berlin. Er umfasst die Abteilung 2 des *Suckower Forsts* und repräsentiert als Besonderheit Brandenburgs die jungpleistozänen Kalkbuchenwälder Nordostdeutschlands. Der Naturwald befindet sich im *Uckermärkischen Kuppen- und Hügelland*, das innerhalb der Großlandschaft *Rückland* der *Mecklenburger Seenplatte* (SCHULTZE 1955, 82 ff.) zur geologisch-geomorphologischen Großlandschaft des Norddeutschen Tieflandes zählt (Abb. 2.1-1).



Abb. 2.1-1: Lage des *Melzower Buchennaturwaldes* (rot markiert) innerhalb des Nordostdeutschen Tieflandes nördlich der Pommerschen Hauptendmoräne (verändert nach GOHL 1972)

Standortsökologisch liegt das Untersuchungsgebiet im Forstlichen Wuchsgebiet (Makrochore) Ostmecklenburg-Nordbrandenburger Jungmoränenland [07], dem die Jungmoränenlandschaften des Pommerschen und Frankfurter Stadiums der Weichselvereisung in Brandenburg nordöstlich des Berliner Urstromtals mit Ausnahme der odernahen Region zugeordnet werden (KOPP & SCHWANECKE 1994, 12 ff.). Innerhalb der landschaftsökologischen Großlandschaft Ostmecklenburg-Nordbrandenburger Jungmoränenland liegt der Naturwald im Wuchsbezirk (Mesochore) Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne.

2.1.1 Geologie, Böden und Relief

Der Naturwald befindet sich auf Endmoränenbildungen der Gerswalder Rückzugsstaffel, nördlich der Pommerschen Haupteisrandlage, am Rande einer Entwässerungsrinne zu den Uckerseen. SCHULTZE (1955) charakterisiert die Landschaft „als flach-mittelsteiles kuppiges Lehmhügelland zwischen 40 und 100 m mit einer Reihe größerer und kleiner Rinnenseen, geschlossenen Hohlformen, Muldentälern und steilen Taleinschnitten“ (SCHULTZE 1955, 86 f.). BEUSHAUSEN (1899) beschreibt die darin enthaltenden Waldstandorte wie folgt: „Diese Endmoränenbildungen [...] gehören [als, Anm. d. Verf.] höchste[n] Punkte [...] ohne Ausnahme einem sich von ferne gesehen, beinahe wie ein kleines Gebirge heraushebenden in einzelne Rücken und Kuppen zerfallenden breiten Hügelwall an, welcher heute im Wesentlichen von der Gramzower und Suckower Forst eingenommen wird und etwa SSW – NNO das Blatt durchzieht [...]“ und „vorwiegend mit prächtigen Buchenwäldern gekrönt“ [...] ist und „dessen zum Theil schluchtartige Senken vielfach von Seen eingenommen werden“ (BEUSHAUSEN 1899, 1).

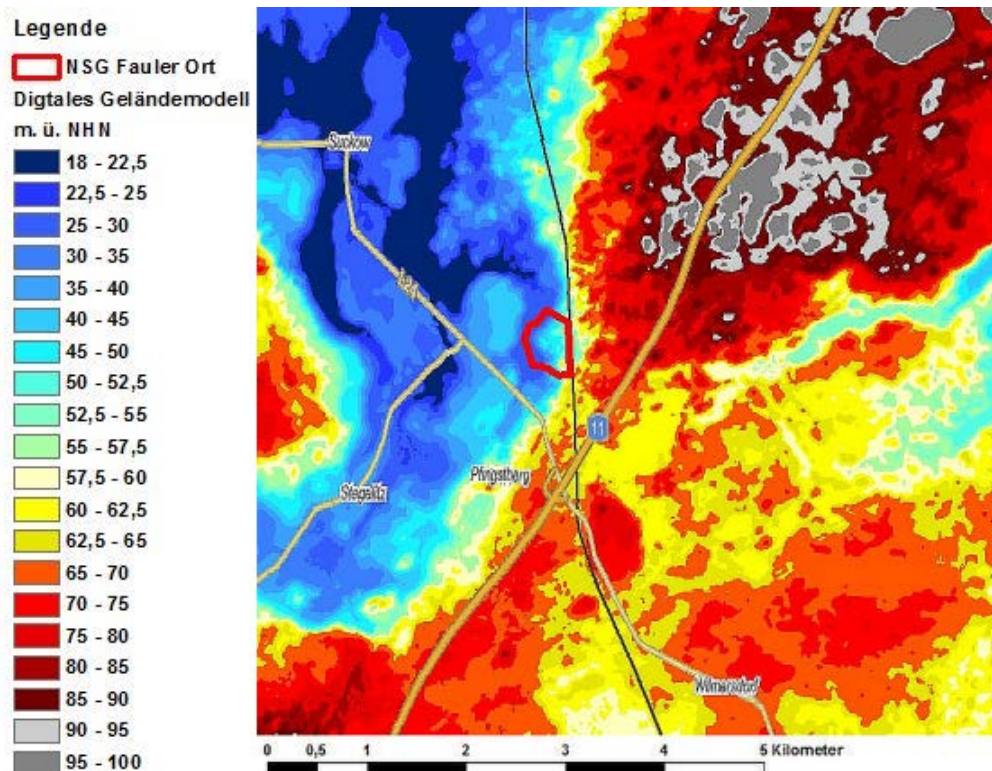
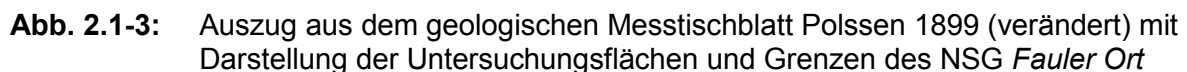


Abb. 2.1-2: Digitales Geländemodell (Auszug) mit 2 m Pixelauflösung (DGM 2 m) des Messtischblattes Polssen mit eingezeichneter TK 50 und Lage des NSG Fauler Ort (Quelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg 2012)



¹ Sogenannter „gehobener Gleichgewichtszustand“ auf Bodenmosaik reicher und kräftiger Stammstandorte durch intakte Basenpumpe (Laubholzstreu von Linde, Ahorn, Hainbuche, Ulme, Esche) als vertikaler und seitlicher Stoffaustausch sowie zusätzliche, oberflächliche Kalziumkarbonatnachlieferung über zahlreiche Windwurfteiler während der natürlichen Disintegrations- und Formierungsphase.

2.1.2 Klima

Die klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsraum werden durch ein Übergangsklima zwischen dem südlich und östlich anschließenden deutlich kontinental beeinflussten „Südmärkischen Klima“ – Klimastufe trocken – und dem stärker maritim nördlich und (nord)westlich beeinflussten „Mecklenburger Klima“ – Klimastufe feucht – charakterisiert (KOPP & SCHWANECKE 1994, 86 ff.; Abb. 2.2-1).

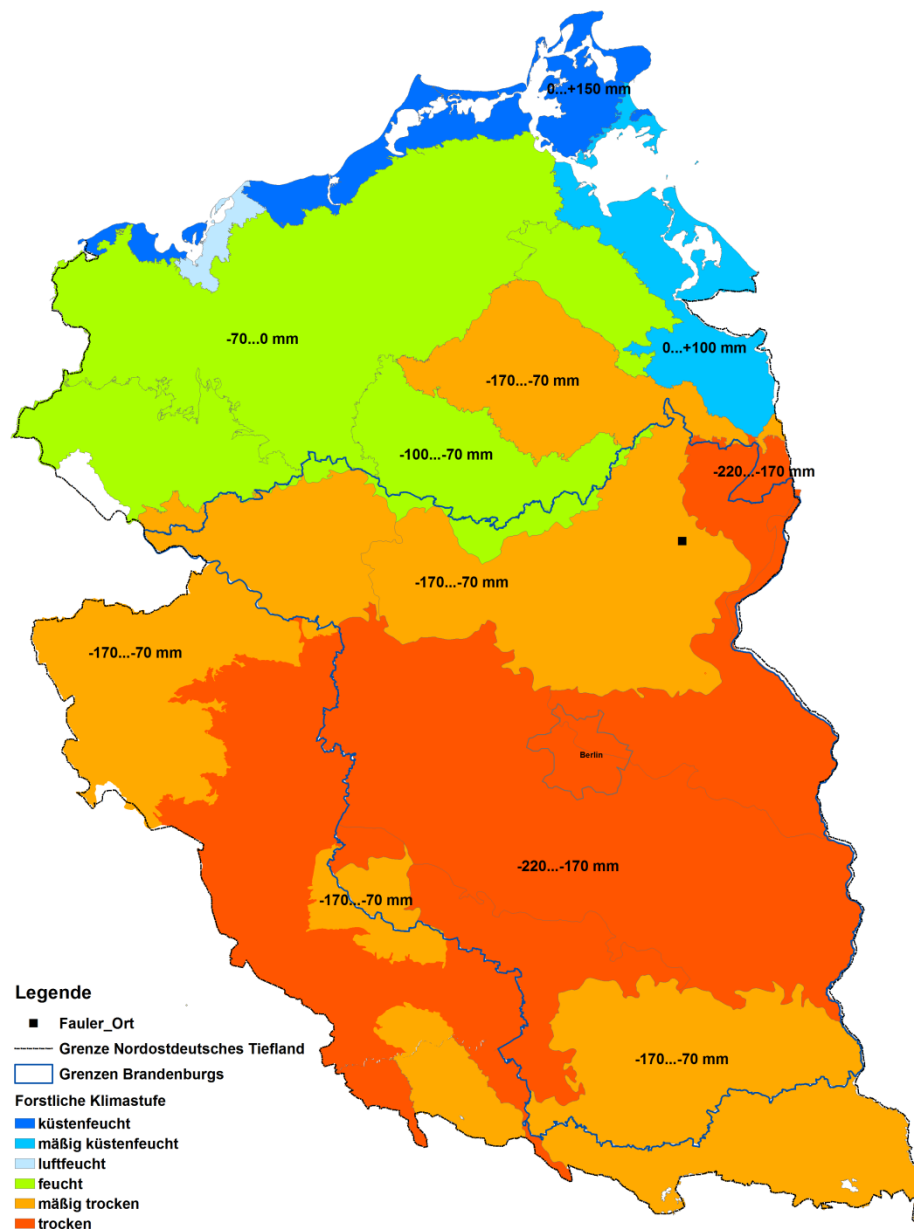


Abb. 2.2-1: Forstliche Klimastufen des Nordostdeutschen Tieflandes mit Angabe der ökoklimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und eingezeichneter Lage des Faulen Ort (KOPP & SCHWANECKE 1994, 36 ff.)

Dieses Klima wurde durch die Forstliche Standortserkundung auf der Grundlage der Klimadaten der Zeitreihe von 1900 bis 1950 als Großklimabereich β (schwächer maritim beeinflusst – Neubrandenburger Klima) der Klimastufe *mäßig trocken* eingestuft. Kennzeichnend für das Großklima der Untersuchungsfläche ist ein mittlerer

Jahresniederschlag von 540 mm bis 600 mm bei einer ökoklimatischen (defizitären) Wasserbilanz von **-170** bis **-70** mm/a (KOPP & SCHWANECKE 1994, 86 ff.). Innerhalb dieses schwächer maritimen Großlimabereiches, der der Klimastufe *mäßig trocken* entspricht, zeigt das Mesoklima innerhalb des für den Naturwald zutreffenden Wuchsbezirks Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne, der an der Ostgrenze des Wuchsgebietes zum benachbarten kontinental beeinflussten Großlimabereich *y* liegt, schon deutlich den klimatischen Übergangscharakter. SCHULTZE (1955) hebt für das *Uckermärkische Kuppen- und Hügelland* den leicht subkontinentalen Klimaeinfluss mit montanen Elementen in der Floristik hervor (SCHULTZE 1955, 87). Nach WOLFF ET AL. (2003) kann das Klima für den Zeitraum 1961 bis 1990 mit Jahresniederschlägen von 554 mm/a als niederschlagsarm, einer mittleren Jahrestemperatur von 8,18 °C und einer mittleren Vegetationsdauer (Anzahl der Tage über 10 °C) von 160 als collin, einer Differenz zwischen der mittleren Januar- und Julitemperatur von 18,52 °C und einem thermohygrischen Index von 11,07 als mäßig subkontinental eingeschätzt werden (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, 282 f.).

Das regionale Klima für das Waldschutzgebiet *Fauler Ort*, in der Mitte der beiden Städte Angermünde und Prenzlau gelegen, kann anhand der Klimawerte der Stationen Angermünde (17 km südsüdöstlich, 56 m ü. NHN), Prenzlau (19 km nördlich, 50 m ü. NHN) sowie unter Einbeziehung der Niederschlagsmessstationen Greiffenberg (8 km südsüdöstlich, 30 m ü. NHN) und Gramzow (12 km nordöstlich, 65 m ü. NHN) für den 50-jährigen Zeitraum 1881 bis 1930 mit durchschnittlichen Jahresniederschlägen unter 540 mm, einem deutlichen Niederschlagsmaximum im Juli mit 76 mm, einer mittleren Januartemperatur (-1,1 °C bis -1,0 °C) und einer mittleren Temperaturschwankung im Jahresverlauf (18,7 °C bis 18,9 °C) beschrieben werden (SCAMONI 1957, 55 ff.).

Tab. 2.2-1: ausgesuchte Klimawerte für die Sommermonate (verändert nach SCAMONI 1957 und WOLFF & RIECK 2005)

Beobachtungsperiode Monate	1881–1930			1951–2003		
	Juni	Juli	August	Juni	Juli	August
durchschnittlicher Monatsniederschlag (mm)	52,5	76	58,25	64,4	60,1	56,2
Summe Sommerniederschlag (mm)	186,8			180,7		
Temperaturmonatsmittel der Sommermonate (°C)	15,7	17,8	16,7	16,0	17,7	17,2
durchschnittliche Sommertemperatur (°C)	16,6			17,0		

Für den 53-jährigen Zeitraum (1951–2003) berechneten WOLFF & RIEK (2005) mittels geostatistischer Verfahren unter Nutzung der Daten des Deutschen Wetterdienstes für die 3 km NNO vom Naturwald entfernte BZE Fläche 1884 (100 m ü. NHN) vergleichbare Niederschlagswerte mit einem (fast) identischen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 538 mm. Im Unterschied zur früheren Periode verlagerte sich das Monatsmaximum des Jahresniederschlages in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts auf den Monat Juni (mit durchschnittlich 64 mm) bei fast gleichhohen Durchschnittswerten im Monat Juli (60 mm) und geringeren Werten im Monat August (56 mm). Auch in der 2. Hälfte des

20. Jahrhunderts konnte der Monat Juli als wärmster Monat bei fast identischen 17,7 °C sowie eine mittlere Temperaturschwankung im Jahresverlauf von über 18 °C beobachtet werden. Im Unterschied zur ersten Beobachtungsperiode stieg die mittlere Januartemperatur (als kältester Monat) in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit -0,7 °C um fast 0,5 °C an. Die Sommer wurden jedoch im Trend mit der Durchschnittstemperatur für die drei Sommermonate von 17,0 °C etwas wärmer. Dies lag offensichtlich an der zeitlichen Vorverlagerung (Zunahme der Juni-Durchschnittstemperaturen) und der zeitlichen Ausdehnung von sommerlichen Hitzeperioden (deutliche Zunahme der August-Durchschnittstemperaturen) bei fast konstanten Julitemperaturen (Tab. 2.2-1). Der Niederschlag in den drei Sommermonaten nahm insgesamt leicht ab. Im Juni nahm er deutlich zu, um anschließend im Juli merklich und im August etwas zu sinken. In der Konsequenz bedeutet die messbare Abnahme der Juliniederschläge und die geringfügige Abnahme der Augustniederschläge bei annähernd konstanten durchschnittlichen Julitemperaturen und gestiegenen durchschnittlichen Augusttemperaturen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme sowie zeitliche Ausdehnung von Hitze- und Trockenperioden im Sommerhalbjahr. Die Zunahme der Anzahl der Sommertage (Tagestemperatur > 25 °C) in der Periode 1951 bis 2000 um fünf Tage im Jahr, dargestellt auf der Grundlage der tagesaktuellen Temperaturdaten der meteorologischen Station Angermünde des Deutschen Wetterdienstes, verdeutlicht diesen Trend (Abb. 2.2-2).

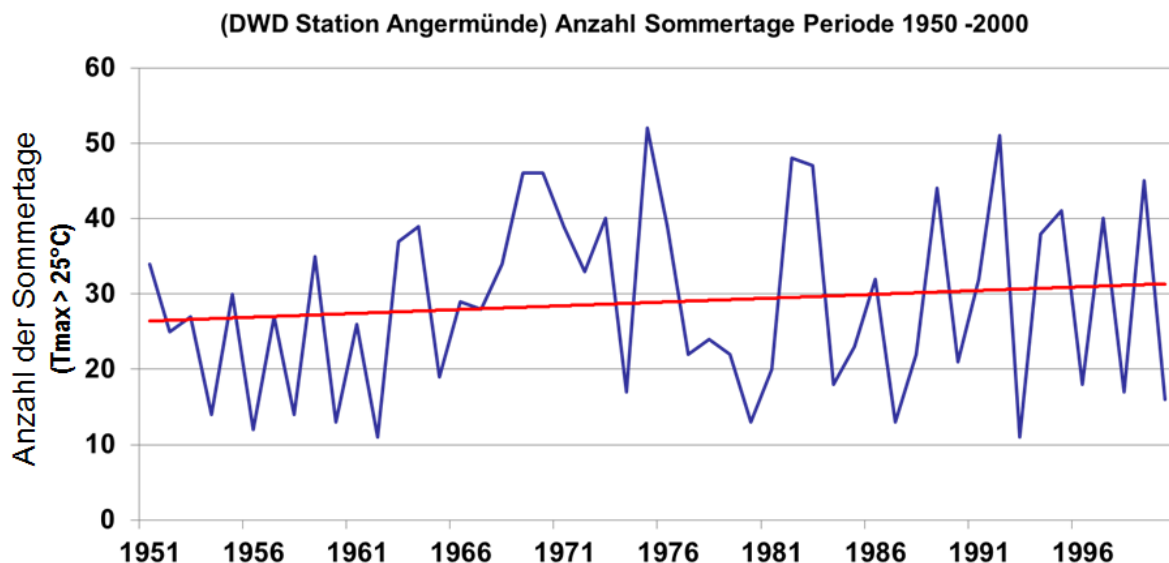


Abb. 2.2-2: Anzahl der Sommertage in der Klimaperiode 1951 bis 2000 der DWD-Station Angermünde (Datenquelle: Tagesaktueller Datensatz der DWD-Station Angermünde für die Periode 1.1.1951 bis 31.12.2000)

Die von SCAMONI (1957, 55 ff.) und SCHULTZE (1955, 87) getroffene Einschätzung eines leicht subkontinentalen Klimacharakters für den Untersuchungsraum kann für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts bekräftigt werden. Gleichzeitig ist im Vergleich der Klimawerte beider Beobachtungsperioden der von JENSSEN & HOFMANN (2009, 37 ff.) für Nordost-Brandenburg prognostizierte Trend einer Nivellierung des jährlichen Niederschlagsverlaufs bei einer sich verstärkt ausprägenden Sommertrockenheit festzustellen.

2.1.3 Deposition

Das Untersuchungsgebiet zählt innerhalb des Bundeslandes Brandenburg zu jenen Gebieten, die einer mittleren Stickstoffbelastung ausgesetzt waren (KONOPATZKY 2001, 38 ff.). Anhand von der in den 1970er Jahren und in der Wiederholungsinventur Ende der 1980er bzw. Anfang der 1990er Jahren kartierten Humusformen (ergänzt durch analysierte Bodenproben der Humusaufgabe) in Kiefernforsten der Bestandeszustandserfassung (BZE) und der ökologischen Dauerbeobachtung (OEWK) konnte für das Gebiet der Anstieg um 0,75 Stickstoffstufen festgestellt werden (Abb. 2.2-3).

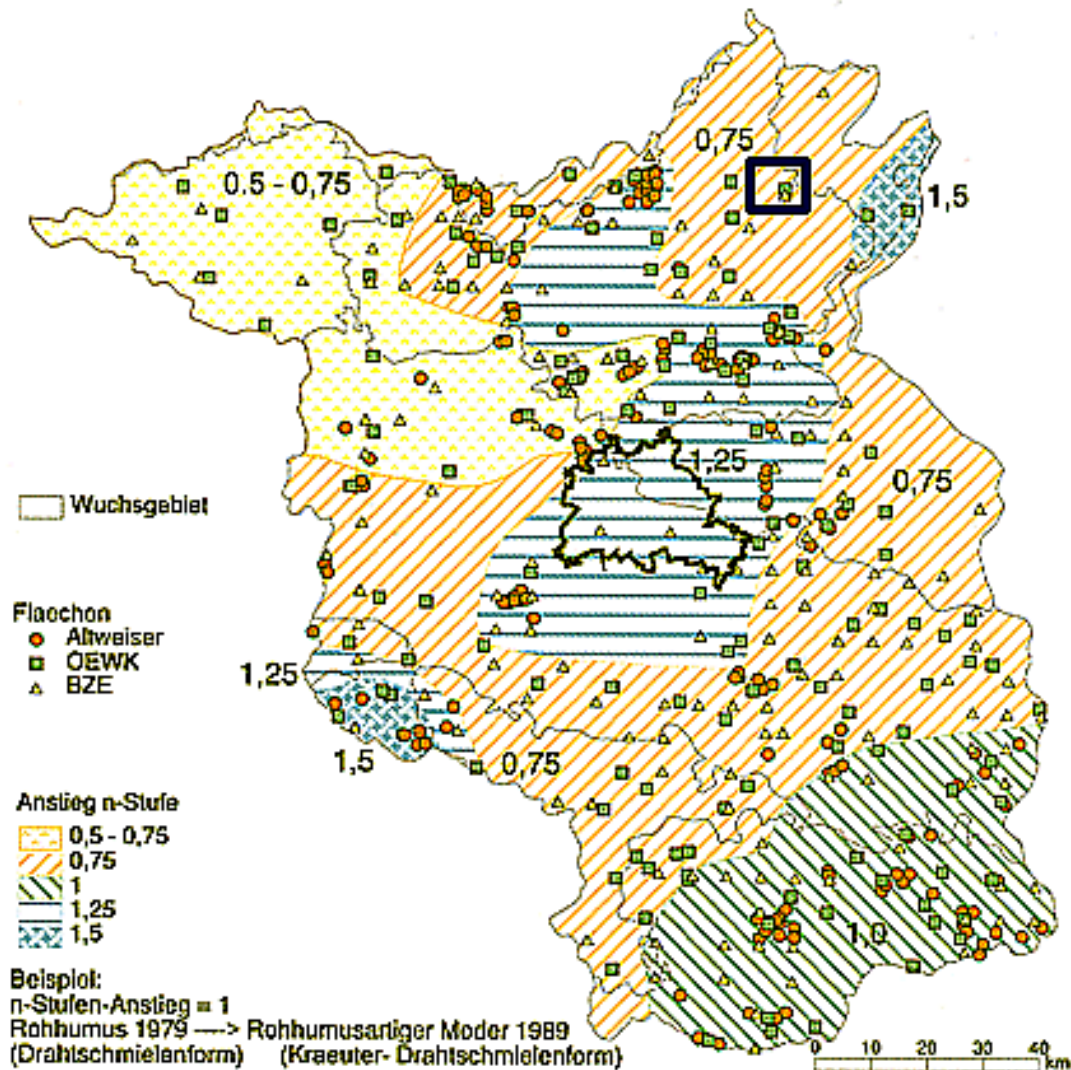
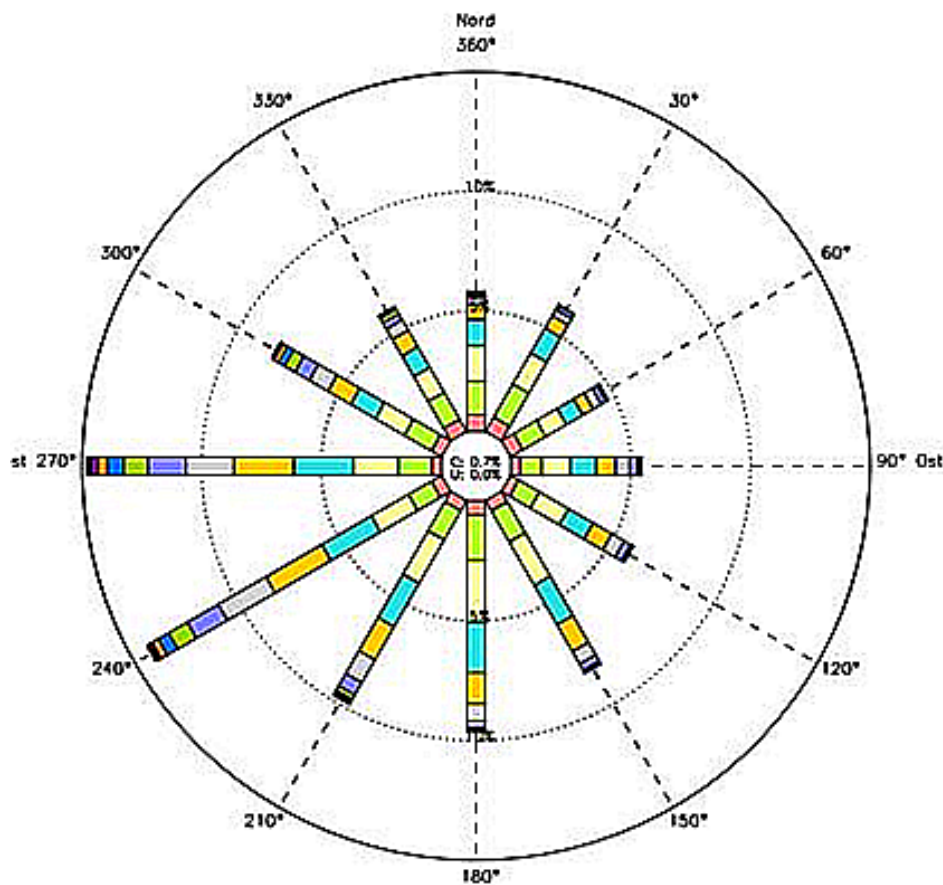


Abb. 2.2-3: Lage der Versuchsflächen mit Darstellung der Veränderungen der Humusformen bzw. Stickstoffstufen der Humusaufgaben in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts (verändert nach KONOPATZKY 2001, 40)

Diese stickstoffinitiierte Humusstufenverbesserung in Kiefernbeständen wurde von einer als gravierend zu bezeichnenden Vegetationsdynamik begleitet, während sie in Buchenwäldern nur geringe Vegetationsänderungen bewirkte (JENSSEN & HOFMANN 2005, 132 ff.). Als langjährige lokale Stickstoffemittenten befinden sich in unmittelbarer Nähe des *Melzower Buchennaturwaldes* eine seit Beginn der 1960er Jahre in 1,5 km südsüdwestlicher Entfernung in Produktion befindliche Schweinemastanlage in der Ortschaft Pfingstberg und

eine Milchviehanlage in 3 km südwestlicher Entfernung, nahe der Ortschaft Stegelitz. Da für den Untersuchungsraum das Vorherrschen von Westwinden anhand der Daten der Wetterstation Angermünde belegbar ist, stellten diese eine erhebliche Stickstoffeintragsquelle dar, die Stoffumsatzprozesse beschleunigten und lokal vegetationswirksam waren (Abb. 2.2-4). So dominierten im Zeitraum 2002 bis 2013 nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes, Wetterstation Angermünde, mit etwa 37 % Westwindlagen (WW, WSW, WNW) und an zweiter Stelle mit ca. 27 % südlichen Windlagen (SSW, SS, SSO) (Abb. 2.2-4). Nördliche (ca. 20 % Anteil) und östliche Windlagen (knapp 16 %) sind unterrepräsentiert. Die Wirkung der Stickstoffeinträge der beiden lokalen Emittenten ist noch Anfang der 1990er Jahre an dem in der zweiten Baumschicht flächig verbreiteten Schwarzen Holunder an einem Prallhang unmittelbar südlich des Naturwaldes erkennbar (Abb. 2.2-5).



[Erläuterung der DWD-Grafik: Die Länge der einzelnen Farbstufen entspricht der prozentualen Häufigkeit mit der die jeweilige Windrichtung auftritt.]

Abb. 2.2-4: Darstellung der Windhäufigkeiten in Prozent der Jahresstunden der Station Angermünde für den Zeitraum 1/2002 bis 12/2013
(Quelle: Windfeldmodellgrafik der Station Angermünde des DWD 2015)



Abb. 2.2-5: Flächige Verbreitung des Schwarzen Holunders (*Sambucus nigra*) unter Hainbuchen-Buchenmischbestand in der südlich des NSG *Fauler Ort* angrenzenden Abteilung 4, einem nach Südwest geneigten Prallhang (Foto: HOFMANN 1995)

Nach 1990 sank durch den Abriss der Rindermastanlage Stegelitz sowie der Produktionseinstellung der Schweinemastanlage Pfingstberg die Stickstoffbelastung. Die Holunderunterschicht ist 20 Jahre später, im Jahre 2015, komplett zusammengebrochen.

2.1.4 Die Potentiell Natürliche Vegetation

Die besondere geografische Lage Brandenburgs im Durchdringungsbereich verschiedener Großklimaeinflüsse – niederschlagsreicheres und hinsichtlich der Jahresschwankung der Durchschnittstemperaturen ausgeglichenes *subozeanisches Klima im Norden und Westen* sowie *niederschlagsärmere, subkontinentale Klimaeinflüsse im Osten* und in der *Mitte* des Landes – führte auf den nicht grundwasserbeeinflussten Waldstandorten zur Entstehung von drei großflächigen potentiell natürlichen Waldgebieten Brandenburgs (HOFMANN & POMMER 2004, 1211 ff.; Abb. 2.2-1).

Während der Norden (mit Ausnahme der Oder nahen Region) und Westen Brandenburgs (colliner Hoher Fläming) auf den anhydromorphen Waldstandorten von der Vegetation des natürlichen Tieflandbuchenwaldes geprägt wird, führte die beschriebene Abnahme des Niederschlages und der Luftfeuchte sowohl bei gleichzeitiger Zunahme der Jahresschwankung der Lufttemperatur von West nach Ost als auch von Nord nach Süd, deren regionale Abstufungen durch höhengeografische Differenzierungen (Meereshöhe über NHN) überprägt werden, zur Herausbildung eines potentiellen Eichenmischwaldgebietes in Mittelbrandenburg und der Oder nahen Region. Zwischen denen befindet sich bei nachlassenden Jahresniederschlägen, höheren Sommertemperaturen und längerer Vegetationszeit als Übergangsgebiet ein natürliches Buchenmischwaldgebiet. Im

Unterschied zum natürlichen Tieflandbuchenwaldgebiet sind hier Mischbaumarten wie Winter-Linde (*Tilia cordata*), Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*), Hainbuche (*Carpinus betulus*), Vogel-Kirsche (*Prunus avium*) und auf den schwächeren Waldstandorten auch Trauben-Eiche (*Quercus petraea*) und Stiel-Eiche (*Quercus robur*) aufgrund der klimatisch bedingten verringerten Konkurrenzkraft der Buche mit am Waldaufbau beteiligt.



Abb. 2.2-6: Das potentiell natürliche Waldbild (Ausschnitt) auf der aktuellen Waldfläche des Wuchsbezirks Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne mit Darstellung der Lage des NSG Fauler Ort und der TK 100 (verändert nach HOFMANN & POMMER 2005)

Der *Melzower Buchennaturwald* ist diesem großflächigen Buchenmischwaldgebiet zuzuordnen. Das natürliche Vegetationspotential auf anhydromorphen Standorten im Wuchsbezirk Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne wird durch den Bingelkraut-Buchenwald auf den kalkhaltigen, frischeren Standorten, den Perlgras-Buchenwald auf den lehmigen Standorten, den Bingelkraut-Winterlinden-(Hainbuchen-)Buchenwald, im weiteren als Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald bezeichnet, auf den kalkhaltigen und trockeneren sowie den Hainrispengras-Hainbuchen-Buchenwald auf den lehmigen höher gelegenen und/oder trockeneren Standortsbereichen gebildet (HOFMANN & POMMER 2004, 1211 ff.; Abb. 2.2-6).

2.2 Forstnutzungsgeschichte des Waldgebietes

Forstwirtschaftlich bedingt, stockte zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf der Untersuchungsfläche ein von der Trauben-Eiche dominierter Waldbestand. Im Jahre 1822 ist der Waldbestand als ein alter Eichen-Buchenmischbestand mit eingesprengten Aspen und Linden beschrieben worden (BESCHREIBUNG UND BETRIEBSBESTIMMUNG VOM FORSTREVIER GRAMZOW 1822). Etwa 41 fm/ha Trauben-Eiche wurden genutzt. Noch 1831 ist das

Grundflächenverhältnis Trauben-Eiche zu Buche zu Weichlaubholz als 2 : 1 : 1 angegeben worden (SPEZIELLE BESCHREIBUNG, ERTRAGSERMITTLUNG UND BETRIEBSPLAN FÜR DAS FORSTREVIER GRAMZOW 1831). Um 1848 hatte die Buche im Grundflächenverhältnis mit der Trauben-Eiche gleichgezogen. 50- bis 70-jährige Buchen dominierten mit eingewachsenen älteren und alten (bis 200 Jahre) Stämmen. „*Junge und alte Eichen sowie Hainbuchen, einzelne Rüster, Ahorne, Aspen, in feuchten Lagen auch Erlen*“, finden sich eingesprengt (ABSCHÄTZUNGSWERK DER OBERFÖRSTEREI. GRAMZOW-LÖCKNITZ 1849). 1922 wird der Bestand als Buche, älter als 180 Jahre, „*Samenschlag', durch Windwurf und Windbruch lückig, überaltert, vom Nordwesten her verjüngt*“ beschrieben (BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW 1922). Eingemischte Holzarten waren Trauben-Eiche (älter als 180 Jahre), Ahorn (180 Jahre), Hainbuche (100 Jahre), Linde (älter als 180 Jahre). Der Vorrat im Oberstand wurde von der Buche (280 fm/ha) dominiert; Mischbaumarten waren Linde (31 fm/ha) und Ahorn (14 fm/ha). Die Trauben-Eiche war nur noch als Restvorrat (7 fm/ha) ausgewiesen. Im Jahre 1923, unmittelbar nach der letzten Forsteinrichtung, erfolgte die Unterschutzstellung des Faulen Ortes als Naturdenkmal nach dem preußischen Polizei- und Ordnungsrecht. Im Jahre 1938 ist diese Unterschutzstellung mit der Ausweisung des Faulen Ortes als Totalreservat innerhalb des gleichnamigen Naturschutzgebietes nach dem Reichsnaturschutzgesetz vom 26. Juni 1935 vollzogen worden. Der Waldbestand wurde im Schutzgegenstand als 250-jähriger Buchenbestand mit 400-jährigen Einzelexemplaren der Buche bezeichnet (HUECK 1941). Die Bestimmungen des Reichsnaturschutzgesetzes galten bis zur Verabschiedung des Naturschutzgesetzes der DDR im Jahre 1954 fort. Mit dem Naturschutzgesetz der DDR wurde die Unterschutzstellung des NSG *Fauler Ort* rechtlich bestätigt. Mit der Verordnung über die Festsetzung von Naturschutzgebieten und einem Landschaftsschutzgebiet von zentraler Bedeutung mit der Gesamtbezeichnung „Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin“ erfolgte zusammen mit einer Vergrößerung des Naturschutzgebietes am 12. September 1990 die Überführung in bundesdeutsches Recht gemäß Artikel 3 Nr. 30, Buchstabe g des Einigungsvertrages vom 18. September 1990.

2.2.1 Kurzer Abriss der vegetations-, standorts- und waldwachstumskundlichen Forschungsarbeiten im Waldschutzgebiet *Fauler Ort*

Die ersten pflanzensoziologischen Studien im Faulen Ort erfolgten nachweislich bereits Mitte des 19. Jahrhunderts (ASCHERSON 1864). Das Vorkommen der Sommer-Linde als eines der nördlichsten Vorkommen in Deutschland wurde in der Flora von Ascherson erstmals erwähnt. Eine erste Kurzbeschreibung des Waldschutzgebietes *Fauler Ort* ist wenige Jahre nach seiner Unterschutzstellung angefertigt worden (HUECK 1941). Im Rahmen der landesweiten Kartierung der Potentiell Natürlichen Vegetation der DDR erfolgte Mitte der 1950er Jahre eine vegetations- und standortkundliche Bearbeitung des Waldschutzgebiet *Fauler Ort* (SCAMONI 1957, 55 ff.). Zur Klärung standörtlicher und waldwachstumskundlicher Fragestellungen ist die Anlage und Bestandesstrukturerrfassung von zwei Dauerversuchsflächen von SCAMONI angeregt worden (HOLZKAMM 1959). Eine weitere Versuchsfläche wurde als Beitrag zur Bearbeitung von Daueruntersuchungsflächen in Buchenwald-Naturschutzgebieten der DDR im Auftrag des ILN Halle (Saale) Mitte der 1960er Jahre eingerichtet (MANSIK 1971).

3. Methodik

3.1 Forschungsansatz

Hauptmethode der vorliegenden Arbeit bildet eine *echte* Zeitreihenuntersuchung von drei von der Baumart Buche dominierten Untersuchungsflächen in einem Tiefland-Kalkbuchenwald. Dieser ist Ende der 1920er Jahre als einer der ersten nordostdeutschen Buchenwaldgebiete aus der forstlichen Nutzung entlassen worden. Durch Erstaufnahmen aus den 1950er und 1960er Jahren lagen umfangreiche klimatische, standörtliche, vegetations- und ertragskundliche Aufnahmen dieses Kalkbuchenwaldes vor. Alle drei ehemaligen Versuchsflächen stehen auf engstem Raum nebeneinander, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich standortkundlicher Parameter. Durch die erfolgreiche Identifizierung und nachfolgende Georeferenzierung dieser drei alten Versuchsflächen war es möglich, unter Verwendung eines Geografischen Informationssystems und unter Anwendung von geostatistischen Verfahren räumliche Veränderungsanalysen der Bestockung durch den Vergleich der Folgebestockung mit der Ausgangsbestockung vorzunehmen und mit einer ökosystemaren Detailstudie in Beziehung zu setzen. Dies wurde durch den glücklichen Umstand begünstigt, dass sich

1. der ehemals forstlich überprägte Waldbestand in den drei Untersuchungsflächen in den vergangenen 55 Jahren nach der Erstinventur in einen neuen Lebenszyklus begeben hat,
und
2. die auf engstem Raum vorhandene unterschiedliche Standortsausstattung (hinsichtlich Relief, Exposition, Hangneigung, Mikroklima, Kalktiefe, Oberbodenzustand, Wasserversorgung, Lichtökologie) beim Wechsel in den neuen Lebenszyklus zur Herausbildung unterschiedlicher miteinander verzahnter Waldökosystemtypen mit veränderter Baumartenmischung führte.

Durch die vergleichende Analyse der sich neu herausgebildeten Waldökosystemtypen mit ihren detailliert erfassten Standortsunterschieden sollen:

1. die standörtlichen Ursachen für die Herausbildung dieser drei Waldökosysteme herausgearbeitet werden,
2. die sich im Wechselspiel mit den Standortsunterschieden herausgebildeten Differenzierungen zwischen den drei Waldökosystemen selbst (Baumartenzusammensetzung, deren genetische Ausstattung, der Oberbodenzustand sowie die in der Rückkopplung des Baumbestandes und des Oberbodens entwickelte Artzusammensetzung der Vegetation sowie das Strahlungsangebot) erforscht werden, und
3. der Versuch unternommen werden, mittels Methoden der Geomatik (Vermessung, Photogrammetrie, Geostatistik, Geoinformationssysteme) den Wechsel in den neuen Lebenszyklus zu rekonstruieren, zu analysieren und zu prognostizieren, um Schlussfolgerungen für eine standortgerechte Bewirtschaftung von Tieflandbuchenwäldern zu treffen.

3.2 Primärdatenerhebung

3.2.1 Historische Versuchsflächeneinrichtung und Datengrundlagen

HOLZKAMM (1959) legte im Jahre 1958 zwei standörtlich und vegetationskundlich in sich homogene Versuchsflächen an, eine quadratische Fläche mit den Außenmaßen von 50 m x 50 m (2500 m²) in Kuppenlage, nachfolgend *Kuppe* genannt, und eine zweite rechteckige, mit einer Flächengröße von ca. 2800 m² in einer östlich davon befindlichen Senke, im Folgenden als *Senke* bezeichnet. MANSIK (1971) richtete zehn Jahre später mit der Wahl einer 50 m x 50 m großen Kernfläche, die in der Mitte von einem 100 m x 10 m großen Transekt geschnitten wurde, eine weitere Untersuchungsfläche im Faulen Ort an². Die Fläche liegt auf einem mäßig geneigten Hang und ist der 50 m x 50 m großen Kuppenfläche nordwestlich vorgelagert und wird in der vorliegenden Arbeit als *Hang* bezeichnet (Abb. 3.2-1).

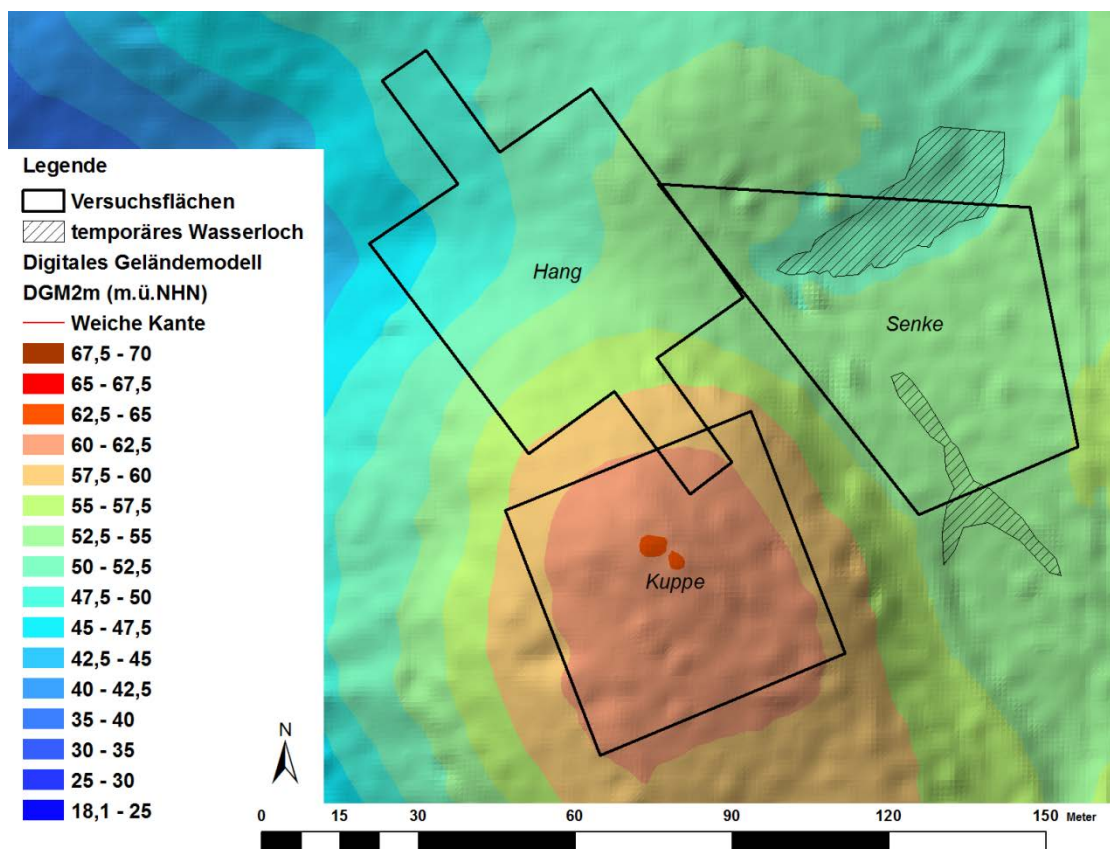


Abb. 3.2-1: Mikrorelief des Naturwaldes *Fauler Ort* mit eingezeichneter Lage der Versuchsflächen *Kuppe*, *Senke* und *Hang* unter Verwendung des DGM 2 m, Höhenbezug DHHN 1992
(Datenquelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg 2012)

Nach dem Abstecken der Grenzen der Versuchsflächen erfolgte in allen drei Flächen mittels Kompass, Bandmaß, Fluchtstangen und Winkelprisma die Erfassung der lokalen Lagekoordinaten [x; y] aller lebenden und toten stehenden Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser größer oder gleich 4 cm und des liegenden Totholzes. (Als

² In der Arbeit von MANSIK, 1971 findet sich kein Hinweis auf die Untersuchungsergebnisse bzw. die Flächenanlage der beiden älteren Flächen *Kuppe* und *Senke*.

Aufnahmekriterium betrug dessen Mindestmittendurchmesser 20 cm). Die Höhen- und Kronenansatzhöhenmessung wurde mittels Blume-Leiss-Baumhöhenmesser durchgeführt. Die Brusthöhendurchmesser sind mit einer mechanischen Kluppe erfasst worden. Die Lage der Baumfußkoordinaten und im Falle der Untersuchungsfläche *Hang* auch des stehenden und liegenden Totholzes und der Verjüngungskerne wurde zeichnerisch im Bestandesgrundriss analog dokumentiert. Sämtliche Kronen wurden abgelotet und eingezeichnet. Zusätzlich lag für die Fläche *Hang* ein Lageplan mit der eingezeichneten Kernfläche, den Vegetationsaufnahmeflächen (je 400 m²) sowie den beiden untersuchten Bodenprofilen vor (Abb. 3.2-2).

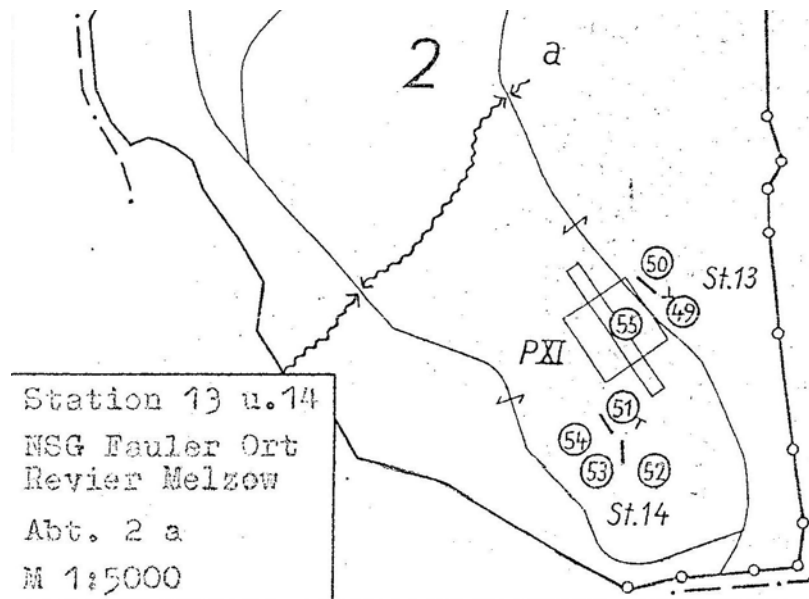


Abb. 3.2-2: Ausschnitt aus dem Lageplan der Stationen 13 und 14 im NSG *Fauler Ort* mit dem Umriss der Untersuchungsfläche *Hang*, der Lage der Vegetationsparzellen 49–55 und der beiden Bodenprofile (⊥); (verändert nach MANSIK 1971, 34)

3.2.2 Georeferenzierte Bestockungsstrukturerfassung

Nach erfolgreicher Identifizierung und Rekonstruktion der Flächen *Kuppe* und *Senke*³ unter Nutzung der lokalen Stammfußkoordinaten der Erstinventuren unter Verwendung des Felddatenvermessungs-, Visualisierungs- und Datenbanksystems FIELD-MAP (Laser Forest Pro der Firma Laser Technology, elektronischer Kompass Map Star II, Stativ und outdoor PC Armor mit der Field-Map Software unter Berücksichtigung der Inklination von 3,2 °) im Jahre 2012 wurden alle drei Versuchsflächen mit Hilfe des elektronischen Tachymeters Sokkia Set 600 und Zwangszentrierungen unter Nutzung der Koordinaten [x; y; z] eines topografischen Festpunktes und zweier Anschlusspunkte im amtlichen Koordinatensystem ETRS-89 (UTM 33. Streifen) georeferenziert. Nachfolgend erfolgte im Winterhalbjahr 2012/2013 die Wiederholungsinventur. Die Baumarten sind morphologisch im Winter- und Sommerzustand angesprochen worden. Im Unterschied zur Erstinventur ist das liegende Totholz mit dem Anfangs- und Enddurchmesser oberhalb von 10 cm am schwächeren Ende sowie sein Zersetzungsgrad erfasst worden (MEYER ET AL., 266). Als Voraussetzung für die Veränderungsanalyse wurden die in den Originalklupplisten der Erstaufnahmen vorliegenden

³ Die Fläche *Hang* gelang es bereits im Beisein des Ersteinrichters Herrn Dr. Mansik im Jahre 2006 im Gelände zu identifizieren. Damals gab es ebenfalls keinen Hinweis auf die älteren Flächen *Kuppe* und *Senke*.

Baum- und Totholzkoordinaten vom lokalen Bezugssystem in das Koordinatensystem ETRS-89 (UTM 33. Streifen) transformiert und nachfolgend die Stammfußkoordinaten in das geografische Informationssystem Arc GIS 10.1 importiert. Zur Charakterisierung der in den drei Untersuchungsflächen in der Ausgangs- und Wiederholungsinventur vorgefundenen Bestockungssituation erfolgte die Bestimmung der Waldentwicklungsphasen anhand der Durchmesser- und Höhenwerte der Bestände (JENSSEN & HOFMANN 1996, 114 ff.). Diese speziell für den Entwicklungszyklus des Perlgras-Buchenwaldes des Nordostdeutschen Tieflandes von den genannten Autoren anhand markanter Bestandesmerkmale leicht diagnostizierbaren Entwicklungsphasen wurden den für Wälder der planaren, collinen und montanen Stufe von LEIBUNDGUT (1959, 900 ff.) erstmals beschriebenen Waldentwicklungsphasen gegenübergestellt (Tab. 3.2-1).

Tab. 3.2-1: Gegenüberstellung der Waldentwicklungsphasen nach LEIBUNDGUT (1959, 900 ff.) mit denen am Perlgras-Buchenwald (*Melico-Fagetum*) des nordostdeutschen Tieflandes von JENSSEN & HOFMANN (1996, 114 ff.) beschriebenen

Waldentwicklungsphasen	
nach Leibundgut (1959)	nach Jenssen & Hofmann (1996)
Verjüngungsphase	Jungwuchs- oder Dickungsstadium
Initialphase	Jungbaum- oder Stangenholzstadium
Frühe Optimalphase	beginnendes Baum-Hallenstadium
Mittlere Optimalphase	Baum-Hallenstadium
Späte Optimalphase	Altbaum-Hallenstadium
Altersphase	Beginnendes Disintegrations- und Formierungsstadium
Zerfallsphase	Disintegrations- und Formierungsstadium

In der vorliegenden Untersuchung werden die Termini der Waldentwicklungsphasen der Tieflandbuchenwälder verwendet (JENSSEN & HOFMANN 1996, 114 ff.).

3.2.2.1 Luftbildrecherche, -analyse und -auswertung

Im Luftbildarchiv des Bundesarchivs Berlin konnten historische Luftbilder (Schwarz-Weiß-Bildnegative als überlappende Bildpaare) vom NSG *Fauler Ort* aus den Jahren 1960, 1970, 1973, 1978 und 1987 sowie entsprechende Metadaten bzw. Hinweise zu den Bildflügen (Kameratyp, Flughöhe, verwendete Brennweiten) ermittelt werden. Die noch fehlenden Daten zu den Brennweiten der Luftbildkameras wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesforst Mecklenburg-Vorpommern (Referat GIS und Fernerkundung) recherchiert. Ergänzend sind ein analoges Color-Infrarot-Luftbildpaar vom 28.7.1991 und digitale Luftbildpaare aus den Jahren 2009 und 2012 (Bezug Landesbetrieb Geobasis Brandenburg) zur Komplettierung der Zeitreihe einbezogen worden. Bis auf den Bildflug vom 30.3.1978 handelte es sich bei allen Bildflügen um Sommerbefliegungen. Die analogen Bildnegative wurden durch den Landesbetrieb Geobasis Brandenburg hochauflösend (600 bzw. 1200 dpi) eingescannt. Aus den eingescannten analogen Bildpaaren konnten mit Hilfe des Photogrammetriewerkzeugs der Software ERDAS IMAGINE 2014 PROFESSIONAL die Orthobilder sowie Stereomodelle aus den Bildpaaren berechnet und in das Geografische Informationssystem ARC GIS 10.1 eingefügt werden. In einem zweiten Schritt erfolgten aus den qualitativ besten Luftbildpaaren der Sommerbefliegungen unter Zuhilfenahme der Software AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL die Berechnung und der Export eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) der Waldbestände in den drei Untersuchungsflächen für die

Jahre 1970 und 1991. Für das Jahr 2012 wurden first pulse Laserdaten für ein zu erstellendes digitales Oberflächenmodell (DOM) sowie last pulse Laserdaten für die Berechnung des digitalen Geländemodells (DGM) vom Landesbetrieb Geobasis Brandenburg bezogen. Aus diesen beiden erzeugten digitalen Modellen ist mit der Formel

$$(nDOM) = DOM - DGM$$

das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) für die Jahre 1970, 1991 und 2012 errechnet worden. Hierzu stand das Werkzeug „Oberflächendifferenz“ der Fernerkundungssoftware ERDAS IMAGINE PROFESSIONAL 2014 zur Verfügung. Im Ergebnis lagen georeferenzierte Rasterbilder mit pixelbezogener Höheninformation der Waldbestände der Untersuchungsflächen für die Jahre 1970, 1991 und 2012 vor. Diese Höhenmodelle im Rasterformat dienten zur Visualisierung der Waldzustände als dreidimensionales Höhenmodell – unter Verwendung der freien Software QT READER. Außerdem standen sie nach Datenimport in ein Geografisches Informationssystem und Umwandlung in ein shape-Format zur Ausweisung von Wuchs- bzw. Höhenklassen zur Verfügung. Die Klassifizierung in Wuchs- bzw. Höhenklassen wurde unter Berücksichtigung der im Field-Map System erfassten Durchmesser-Höhen-Beziehungen der erfassten Baume in den Untersuchungsflächen durchgeführt (Tab. 3.2-2). Die Klassenbildung erfolgte in Anlehnung an die Betriebsregelungsanweisung Landeswald im Land Brandenburg, in der Fassung vom 1.11.2000.

Tab. 3.2-2: Aus dem Vegetationshöhenmodell klassifizierte Wuchs- und Höhenklassen

Wuchsklasse	Höhenklasse	Höhe
Lücke	1	0–0,3 m
Anwuchs	2	0,3 m–1,5 m
Jungwuchs	3	1,5 m–3,0 m
Dickung	4	3,0 m–7,5 m
Stangenholz	5	7,5 m–10 m
	6	10 m–12,5 m
	7	12,5 m–15 m
	8	15 m–17,5 m
Baumholz	9	17,5 m–20 m
	10	20 m–22,5 m
	11	22,5 m–25 m
	12	25 m–27,5 m
	13	27,5 m–30 m
	14	30 m–32,5 m
	15	32,5 m–35 m
	16	35 m–37,5 m
	17	37,5 m–39,3 m

3.2.3 Standortsökologische Untersuchungen (Bestimmung des pH_{KCl}-Werts; Gesamtkohlenstoff, Gesamtstickstoff; Bodenart, Kalktiefe und Strahlungsschätzung)

Zur Klärung von Zusammenhängen zwischen Standort (insbesondere Oberbodenzustand, Bodenart, Kalktiefe, Exposition, Hangneigung und Hangrichtung), Vegetation, Licht und Bestockung in der topischen Ebene wurden die drei Untersuchungsflächen mit einem systematischen nordorientierten 10 m x 10 m Raster überzogen (Abb. 3.2-3). Die

Einmessung erfolgte unter Verwendung des Field-Map Systems. Startpunkt war die mit einem Eisenpfahl verpflochte Südwestecke der *Kuppe*, deren ETRS 89 Koordinate [x (m); y (m)] aus der im Jahre 2012 mittels Zwangszentrierungen und elektronischen Tachymeter Sokkia Set 600 erfolgten Einmessung vorlag. Jeder Rasterpunkt wurde mit einem 30 cm langen nummerierten Holzpfahl gekennzeichnet.

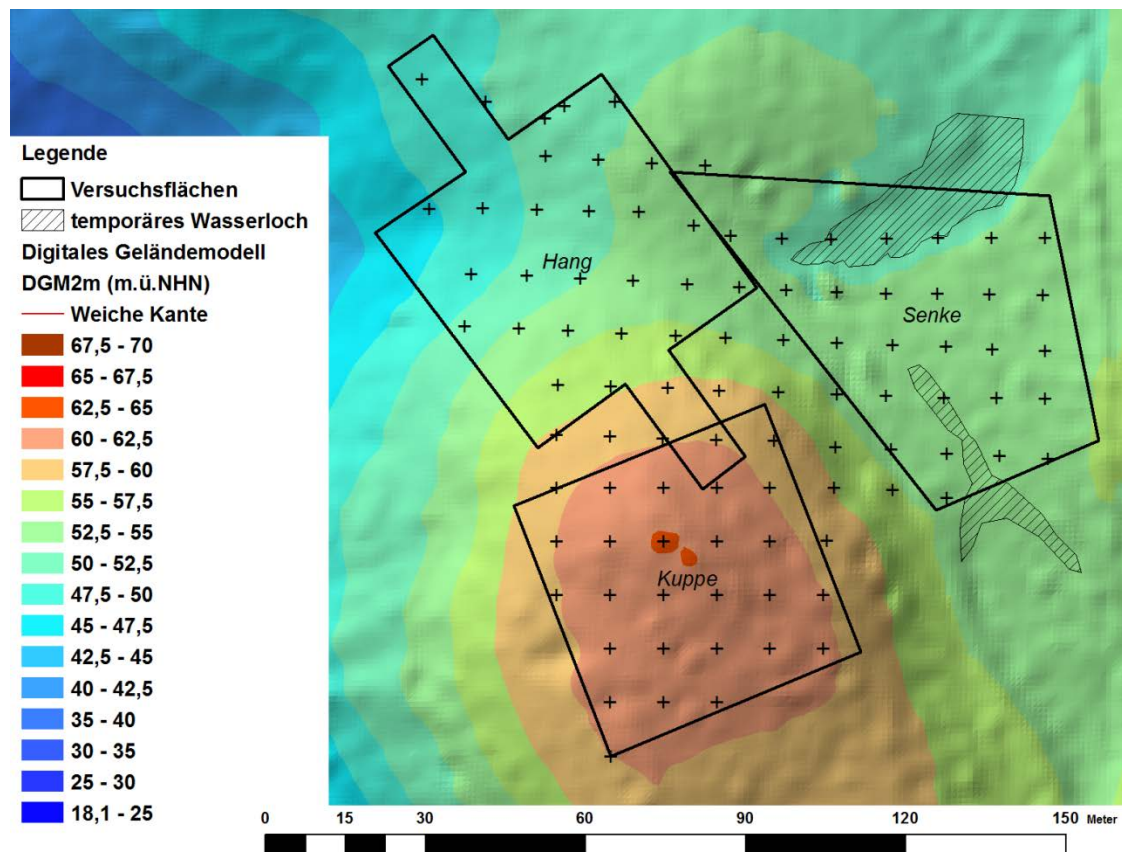


Abb. 3.2-3: 10 m x 10 m Raster als Grundlage nachfolgender standorts- und vegetations-ökologischer Untersuchungen mit Darstellung des DGM 2 m, Höhenbezug DHHN 1992. (Quelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg 2012)

3.2.3.1 Ermittlung der Kalktiefen

Aufgrund fehlender feinauflösender Standortskarten für das NSG *Fauler Ort*⁴ wurden zur Klärung der Stammeigenschaften der Böden an ausgewählten Rasterpunkten des 10 m x 10 m Rasternetzes Bohrstockbodenproben entnommen. Sämtliche Rasterpunkte innerhalb der *Kuppe* und ausgewählte Punkte in den beiden anderen Untersuchungsflächen sind hierfür herangezogen worden. Die Bestimmung der Kalktiefe und die Ansprache der Bodenhorizonte, deren Mächtigkeit und der Bodenart wurden durchgeführt. Die Auswahl der zu beprobenden Rasterpunkte in den Flächen *Hang* und *Senke* erfolgte entlang von fünf Katenen. Diese verliefen, ausgehend von der *Kuppe*, hangabwärts in die beiden tiefer gelegenen Untersuchungsflächen in den Himmelsrichtungen Nord und Ost (je einmal an der westlichen und einmal an der östlichen bzw. nördlichen und südlichen Grenze der *Kuppe*

⁴ Die Forstabteilung 2, die den Faulen Ort umfasst, ist in den 1960er Jahren als ein Stauchmoränenkomplex verschiedener Bodentypen nach der SEA 1995 deklariert worden. Eine lagemäßige (zeichnerische) Zuordnung der einzelnen Bodenarten unterblieb.

beginnend) und einmal von der nordöstlichen Grenze der *Kuppe* in nordöstliche Richtung. In den Fluchtrichtungen der fünf Katenen ist jeder Rasterpunkt untersucht worden. Hierzu wurden mit Feldmethoden unter Verwendung eines 2-m-Bohrstocks, eines Zollstocks und 0,1 M Salzsäure die Kalktiefe im Bohrstockprofil lokalisiert und die einzelnen Horizonte sowie deren Mächtigkeit angesprochen. Die Bohrstockerkundung bildete die Grundlage für Auswahl, Anlage und Ansprache sowie nachfolgende Beprobung je eines Bodenprofils pro Untersuchungsfläche in Ergänzung der beiden auf der *Kuppe* und in der *Senke* im Jahre 1968 angelegten Profile (MANSIK 1971, 34; Abb. 3.2-2). Diese wurden am 20.10.2005 rekonstruiert und beprobt (SEDLACZEK 2006, 20).

3.2.3.2 Bestimmung des pH_{KCl} -Wertes, Gesamtstickstoff und Gesamtkohlenstoff des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm)

An jedem der georeferenziert vorliegenden 95 Rasterpunkte erfolgte die Entnahme einer Mischprobe aus dem Mineralboden der Tiefenstufe 0–5 cm unter Zuhilfenahme eines 100 cm³ Stechzylinders im Herbst 2014 (8.10., 10.10. und 12.11.2014). Jede Mischprobe setzte sich aus vier Einzelproben zusammen, die jeweils in einem Abstand von 1 m zum Rasterpunkt in den vier Haupthimmelsrichtungen (Nord, Ost, Süd und West) entnommen wurden. Die Bodenproben wurden im Zentralen Ökologischen Labor der HNEE nach Trocknung durch Feinsiebe geleitet und von allen sichtbaren Feinwurzeln befreit. Im Anschluss erfolgte die Bestimmung des pH_{KCl} -Wertes, des Gesamtstickstoff- und des Gesamtkohlenstoffgehaltes gemäß der im Leistungskatalog des Zentralen Ökologischen Labors der Hochschule ausgewiesenen Methoden (Tab. 3.2-3). Die rasterpunktbezogenen Werte wurden in einer Datenbank erfasst.

Tab. 3.2-3: Übersicht über die vom Zentralen Ökologischen Labor der HNEE verwendete Labormethoden und Parameter

Parameter	Labormethode	Literatur
pH_{KCl} -Wert	Extraktion in 0,1M KCl Aufschlännen und Potentiometrie	HFA 2005: A3.1.1.8
Gesamtstickstoff (organisch)	Elementaranalyse (Verbrennung nach Dumas)	HFA 2005: D58.1.1.1, 2.1, DIN ISO 13878 HBU 2005: 3.4.1.58a
Gesamtkohlenstoff (organisch)		
Bestimmung der organischen Substanz in % (Glühverlust)	Glühen, Gravimetrie	HFA 2005: A3.4.1 in Anlehnung DIN EN 12879
Korngrößenbestimmung (einschließlich Ton- und Schluffgehalt)	Siebreihe nach der Hausmethode	
Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (Ake)	Schüttelextraktion in NH_4Cl Lösung, nachfolgende Analyse im ICP-AES für (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na) bzw. Potentiometrie (H)	
Bestimmung des Carbonatgehaltes	Gasvolumetrische Bestimmung nach Scheibler	

3.2.3.3 Untersuchungen am liegenden Totholz

Die erfolgreiche Rekonstruktion und nachträgliche Georeferenzierung der Erstinventuren und die georeferenzierte Wiederholungsinventur 2012 boten die Möglichkeit, der Frage nach dem

Grad der quantitativen Beeinflussung von einzelnen Totholzstämmen der Baumart Buche auf den Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt der Humusaufgabe und die oberste Mineralbodenschicht (0–5 cm) sowie deren räumlicher Wirkungsausdehnung nachzugehen. Hierzu sind in den drei Untersuchungsflächen stark zersetzte Reste von insgesamt zehn zuvor identifizierten und eingemessenen Buchen der Ausgangsbestockungen aus den Jahren 1958 bzw. 1968 ausgewählt worden. Aus der Totholzaufgabe dieser zehn Buchenreste, der unmittelbar darunter sowie seitlich vom liegenden Totholz angrenzenden mineralischen Oberbodenschicht (Tiefenstufe 0–5 cm) wurden Bodenproben genommen. Die Probennahme erfolgte unter Verwendung von 100-cm³-Stechzylindern am 10.12., 11.12. und 15.12.2014. Je Schicht (Aufgabe und darunter befindlicher Mineralboden) wurden drei Einzelproben entnommen, die an der Längsachse des Totholzes verteilt und deren Lage am liegenden Totholz mittels Zollstock vermessen worden sind (Abb. 3.2-4). Die seitlich zur Längsachse des liegenden Totholzstückes entnommenen Proben aus der Tiefenstufe 0–5 cm erfolgten mit drei Wiederholungen unmittelbar neben den aktuellen Außengrenzen des liegenden Stammstückes auf Höhe der zuvor beprobten Aufgabe (Abb. 3.2-4). In einer Entfernung von einem Meter zum Totholz wurde zusätzlich eine Probe aus der Tiefenstufe 0 bis 5 cm des mineralischen Oberbodens auf Höhe des mittleren der drei Aufgabeprobenorte auf der Längsachse des Totholzes genommen. Die Proben sind dem Zentralen Ökologischen Labor der HNEE übergeben und dort aufbereitet worden. Der Analyseauftrag umfasste die Bestimmung des Gesamtstickstoff- und des Gesamtkohlenstoffgehaltes sowie die Ermittlung des prozentualen Anteils an organischer Substanz durch Glühverlust⁵ (Tab. 3.2-3). Die Analysedaten wurden in einer Datenbank abgelegt. Für die Herleitung der Makroelementvorräte Kohlenstoff und Stickstoff der zehn ausgewählten Buchen der Erstinventuren sind die folgenden Formeln zur Berechnung der Makroelementvorräte in Buchenbeständen benutzt worden (KRAUß & HEINSDORF 2008, 10):

$$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln(d_{1,3}) + b_2 \cdot \ln(h)$$

$d_{1,3}$ – Durchmesser in 1,3 m Höhe h – Höhe des Baumes

Sowohl die Quantifizierung der Trockenmassen der oberirdischen Dendromasse (TM Dendro gesamt), der Trockenmasse des Schaftes mit Rinde (STM m. R.) der Kohlenstoff (C/Baum)- und Stickstoffvorräte (N/Baum), jeweils für die oberirdische Dendromasse als auch die Trockenmasse des Schaftes mit Rinde, der zehn ausgewählten Buchen wurde mit folgenden sechs Modellen durchgeführt (KRAUß & HEINSDORF 2008, 37 ff):

TM Dendro gesamt [kg]:	$\ln y = -1,93927 + 2,1303 \cdot \ln(d_{1,3}) + 0,3347 \cdot \ln(h)$
STM m. R. [kg]:	$\ln y = -3,48412 + 1,8739 \cdot \ln(d_{1,3}) + 1,0219 \cdot \ln(h)$
C/ Baum (TM Dendro gesamt) [kg]:	$\ln y = -4,25064 + 1,8439 \cdot \ln(d_{1,3}) + 1,0539 \cdot \ln(h)$
C/ Baum (STM m. R.) [kg]:	$\ln y = -2,64497 + 2,1211 \cdot \ln(d_{1,3}) + 0,3283 \cdot \ln(h)$
N/Baum (TM Dendro gesamt) [kg]:	$\ln y = 1,7375 + 2,1681 \cdot \ln(d_{1,3}) + (-0,6686 \cdot \ln(h))$
N/Baum (STM m. R.) [kg]:	$\ln y = -1,57603 + 1,66 \cdot \ln(d_{1,3}) + 0,7313 \cdot \ln(h)$

⁵ Unter **Glühverlust** [%] versteht man den Anteil organischer Substanz einer Probe. Für ihre Bestimmung wird die Probe bei Temperaturen größer 500 °C so lange gegläht, bis keine Gewichtsabnahme mehr festzustellen ist. Die Differenz zwischen der Probenausgangsmasse, abzüglich Glührückstands bildet den *Glühverlust*. Ein hoher *Glühverlust* deutet auf einen hohen Anteil an organischer Substanz in der Probe hin.



Abb. 3.2-4:Übersichtsaufnahme (oben) und Detailaufnahme (unten) von der Probenahme (hier: Mineralboden 0–5 cm) im Bereich des liegenden Totholzes (ehemalige Buche Nr. 5 der Senke)

Von allen in der Wiederholungsinventur identifizierten liegenden toten Buchen konnte anhand der Formel (Länge · Mittendurchmesser · Auflagendicke) das Volumen der Reste der Totholzstämme berechnet und in Beziehung zu den Ausgangsvolumina (Schaftholz) gesetzt werden, so dass ein Vergleich der Trockenmassen und Elementvorräte von Kohlenstoff und

Stickstoff zwischen den Erst- und Wiederholungsinventuren möglich wurde. Im Falle der bis zur Wiederholungsinventur erfolgten vollständigen Mineralisierung der in der Erstinventur mit Durchmesser und Höhe erfassten Bäume wurden für die geschätzten Bilanzrechnungen des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes der vergangenen vier Jahrzehnte auf die Volumina der Erstinventurdaten (Einzelbaumvolumen Schaffholz [VS] und Einzelbaumvolumen Derbholz [VD]) zurückgegriffen und sie als konstant angenommen. Hierfür sind folgende Schaffholz- und Derbholzvolumenfunktionen (LOCKOW, ZIT. NACH DEGENHARDT, 2001) verwendet worden:

$$VS = 0,000053846069 \cdot D^{1,796227} \cdot H^{1,067808} \text{ (für Jungbäume: Alter < 31 Jahre)}$$

$$VD = 10^{-6} \cdot [D^2 \cdot H \cdot (34,9429 + 4,7955 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 + \frac{36,6829}{H} + 0,0996 \cdot H) - 8430,8 \cdot \frac{H}{D}]$$

3.2.4 Vegetationsökologische Untersuchungen

Für die Rekonstruktion des Vegetationszustandes zum Zeitpunkt der Erstinventuren konnte auf den historischen Lageplan zurückgegriffen werden (MANSIK 1971, 34; Abb. 3.2-2). In diesem sind auf dem *Hang* die sieben Vegetationsparzellen in ihrer räumlichen Lage zueinander maßstabsgenau dargestellt. Die beiden Bodenprofile, jeweils eins auf der *Kuppe* und in der *Senke*, sind eingezeichnet (MANSIK 1971, 34; Abb. 3.2-2). MANSIK (1971) nahm die Vegetation nach der Skala von BRAUN-BLANQUET (1964) auf. Nach der Identifizierung und Vermessung der Fläche *Hang* war es möglich, die Vegetationsaufnahmen von 1968 zu georeferenzieren und den drei Untersuchungsflächen zuzuordnen. Zur Rekonstruktion der Erstinventur der Vegetation im Jahre 1968 wird auf die Beschreibungen und Vegetationsaufnahmen der Parzellen 49 (*Senke*) und 52 (*Kuppe*) zurückgegriffen (Abb. 3.2-2).

Die Wiederholungsinventur der Vegetation wurde wie folgt durchgeführt:

1. Zur Erarbeitung eines Gesamtbildes der aktuellen Vegetation im Rahmen der Wiederholungsinventur erfolgte im Juni 2014 (Sommeraspekt) und April 2016 (Frühjahraspekt) eine flächige, versuchsflächenübergreifende Kartierung der Krautschicht nach der Schätzskala von BRAUN-BLANQUET (1964) in einen maßstabsgenauen Lageplan. Unter Verwendung von georeferenzierten Versuchsflächenkarten, die die Höhenlinien des digitalen Geländemodells sowie die baumartenspezifisch eingefärbten Stammfußpunkte des stehenden Bestandes enthielten, wurden die räumlichen Grenzen und Mengenanteile der kleinstandörtlich differenzierten Krautvegetation kartiert und nachträglich digitalisiert. Die Datenablage erfolgte in einer Vegetationsdatenbank. Zur Herausarbeitung von Unterschieden in der flächigen Kartierung wurden die kartierten Arten den soziologischen Artengruppen zugeordnet (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.) und flächenspezifisch soziologische Artengruppenkombinationen gebildet. Diese Artengruppenkombinationen dienten schlussendlich zusammen mit den Daten der georeferenzierten Bestockungsstrukturerfassung sowie den Bodenanalysenwerten der 10 m x 10 m Rasterbeprobung der Ausscheidung, Lokalisierung und Abgrenzung von natürlichen Wald-Ökosystemtypen (HOFMANN & POMMER 2013, 65 ff.).
2. Zur detaillierten Feststellung der vegetationskundlichen Unterschiede zwischen den Flächen *Kuppe*, *Senke* und *Hang* wurden Wiederholungsaufnahmen in den Mansik'schen Vegetationsparzellen Nr. 52 (auf der *Kuppe*), Nr. 51 (am höchsten gelegene Teile der Fläche *Hang*), Nr. 55 (im Übergang vom Mittel- zum Unterhang der Fläche *Hang*) sowie in einer neu angelegten, zentral in der Fläche *Senke* liegenden

Aufnahmefläche (Parzelle Nr. 48) in den Jahren 2008, 2014 und 2016 unter Beachtung der folgenden Schichtenteilung durchgeführt (Abb. 3.2-2; 4.2-28):

- **Obere Baumschicht**
(relativ gleichhoch vergesellschaftete Baumarten in der jeweils obersten Baumschicht)
- **Untere Baumschicht**
(alle Baumarten deutlich unter der obersten Baumschicht, jedoch mind. 5,0 m hoch)
- **Strauchschicht 1**
(Bäume und Sträucher im Höhenbereich 1,5 m bis 5,0 m)
- **Strauchschicht 2**
(Bäume und Sträucher unterhalb einer Höhe von 1,5 m)
- **Krautschicht**
(Gräser, Kräuter, Halbsträucher und Farne)
- **Moosschicht**

Die Ermittlung der artspezifischen Häufigkeiten erfolgte durch die prozentuale Deckungsgradschätzung der lotrecht auf die Erdoberfläche projizierten Pflanzenoberfläche. Die Fläche der Vegetationsparzellen beträgt jeweils ca. 400 m².

3. Um aus den Vegetationsaufnahmen Rückschlüsse auf den Oberbodenzustand ziehen zu können, wurde zunächst die Zuordnung der Pflanzenarten zu den soziologischen Artengruppen durchgeführt. Die soziologischen Artengruppen beinhalten dabei jene Arten, die sich im Rahmen der gesamten Vegetation annähernd gleich verhalten, d. h., die innerhalb bestimmter Vegetationsräume gemeinsam vorkommen, dort ihr Vorkommensmaximum bzw. ihr Optimum erreichen und gemeinsam in den übrigen Vegetationsausbildungen fehlen. Die ökologische Amplitude einer Artengruppe ist dabei weiter als die einer Pflanzengesellschaft (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.). Deshalb wurde in einem zweiten Schritt das individuelle Kombinationsmuster der soziologischen Artengruppen (und ihrer Mengenentfaltung) durch die Berechnung der jeder Art bzw. Artengruppe zugeordneten dreistelligen dekadischen Kenziffern (DK-Wert) unter Berücksichtigung des prozentualen Deckungsgrades der jeweiligen Artengruppe im Verhältnis zum Gesamtdeckungsgrad nach den Formeln

Oberboden-Feuchte (D_{KF}):

$$\emptyset D_{KF} = \frac{\sum (\text{Deckungsgrad einer Artengruppe} \cdot \text{mittlerer Feuchtwert der Gruppe})}{\text{Gesamtdeckungsgrad der Feldschicht}}$$

Oberboden-Stickstoffgehalt (DK_{C/N}):

$$\emptyset DK_{C/N} = \frac{\sum (\text{Deckungsgrad einer Artengruppe} \cdot \text{mittleres C/N-Verhältnis der Gruppe})}{\text{Gesamtdeckungsgrad der Feldschicht}}$$

Oberboden-Basensättigung (DK_{V%}):

$$\emptyset DK_{V\%} = \frac{\sum (\text{Deckungsgrad einer Artengruppe} \cdot \text{mittlere Basensättigung der Gruppe})}{\text{Gesamtdeckungsgrad der Feldschicht}}$$

durchgeführt, um eine vegetationskundlich-ökologische Bewertung des Oberbodenzustandes vornehmen zu können (HOFMANN & POMMER 2013, 31 ff.). Der Oberbodenzustand jeder Vegetationsparzelle wird im Ergebnis durch eine Zahlenfolge charakterisiert, wobei die erste Stelle den durchschnittlichen Oberbodenfeuchtezustand

und die nachfolgenden den Oberbodennährstoffzustand über den Stickstoffgehalt (2. Stelle) und die Basensättigung (3. Stelle) kennzeichnen. Dabei bedeutet die dekadische Kennziffer 10 das Maximum der jeweiligen Feuchte-, Stickstoff- bzw. Basensättigungsskala und damit den Grenzstandort des Waldwachstums infolge Überschusses. Die dekadische Kennziffer 1 der jeweiligen Feuchte-, Stickstoff- bzw. Basensättigungsskala charakterisiert das entgegengesetzte standörtliche Extrem und steht für einen Grenzstandort des Waldwachstums infolge Wassermangels bzw. minimaler Stickstoff- oder Basensättigung (Tab. 3.2-4).

Tab. 3.2-4: Dekadische Kennziffern und deren standörtliche Interpretation (HOFMANN & POMMER 2013, 31)

	DK_F (Dekadische Kennziffer Feuchte) DK_{FEUCHTE} (1. Stelle)	DK_T (Dekadische Kennziffer Trophie)	
		DK_{C/N} (2. Stelle)	DK_{V%} (3. Stelle)
10	nass, periodisch stehend überwässert	sehr N-reich	stark karbonathaltig
9	nass	N-reich	karbonathaltig bis sehr basenreich
8	feucht	N-reich bis N-kraftig	basenreich
7	mäßig feucht bis frisch, kühl	N-kraftig	basenreich bis basenkraftig
6	feucht bis mäßig frisch	N-kraftig bis mittel N-haltig	basenkraftig
5	mäßig feucht bis mäßig trocken	mittel N-haltig	mittelmäßig basenhaltig
4	frisch bis mäßig trocken, sommerwarm	schwach N-haltig	mittelmäßig bis schwach basenhaltig
3	mäßig trocken bis sehr trocken	ziemlich N-arm	ziemlich basenarm
2	trocken, sommerwarm	N-arm	basenarm
1	sehr trocken, sommerwarm	sehr N-arm	sehr basenarm

4. Zur indirekten Ermittlung der in den Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* vorhandenen kleinklimatischen Standortsunterschiede mit dem Ziel der Herausarbeitung einer Rangfolge der Flächen in Hinblick auf die klimatischen Faktoren Temperatur und Bodenfrische erfolgte eine Analyse der Vegetations- und Bestockungssituation in den Vegetationsparzellen 48 (*Senke*), 55 und 51 (*Hang*) sowie 52 (*Kuppe*) durch einen Methodenvergleich. Hierfür herangezogen wurden:
 - A. Die Berechnung der empirisch gewonnenen ökologischen Zeigerwerte für Licht, Temperatur und Feuchte (ELLENBERG 2000), entnommen der Datenbank Flora Deutschlands (www.ecology.uni-jena.de/ecologymedia/Zeigerwerte.xls) modifiziert für die Zeigerwerte der Baumarten mit dem Arbeitspapier der Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standortserkundung www.afsv.de/download/arbeitsgruppe/Oeko_Potenz_Baumarten).
 - B. Die Arealtypenanalyse der Baumarten in der Baum-, Strauch- und Krautschicht mit der Angabe von Klimalage und Klimaareal (OBERDORFER 1990).
 - C. Die Ermittlung und flächenspezifische Erfassung der Differentialarten für Sommerwärme (4. Hauptgruppe) und Kühle (7. und 8. Hauptgruppe) der soziologischen Artengruppen und Neuberechnung des dekadischen Feuchtwertes unter Einbeziehung aller Pflanzenarten der Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht (HOFMANN & POMMER 2013, 32 ff.).

3.2.5 Populationsgenetische Untersuchungen

Die drei Baumarten Buche, Winter-Linde und Sommer-Linde wurden mit dem Ziel der Beschreibung der populationsgenetischen Unterschiede (nach Standort, nach der Baumgeneration und kombiniert nach Standort und Baumgeneration) zwischen den drei Versuchsflächen analysiert. Die Probenahme fand am 20. bis 23. August 2013 statt. Insgesamt wurden von 200 lebenden Exemplaren der Buche Blattproben entnommen (ab einem Brusthöhendurchmesser von 1 cm). Diese wurden nummeriert und eingefroren. Von den auf den drei Untersuchungsflächen vorkommenden 116 Sommer- und Winter-Linden⁶ erfolgte am 23.4. 2013 die Entnahme jeweils einer Kambiumprobe aus dem Bereich des Stammfußes (Abb. 3.2-5). Der Mindestbrusthöhendurchmesser der beprobten Linden betrug probenartnahmebedingt 2,5 cm. Auch diese Proben wurden nummeriert und zusammen mit den Buchenblättern im gefrorenen Zustand an das Bayerische Amt für Saat- und Pflanzenzucht (ASP) zur genetischen Analyse übersandt.



Abb. 3.2-5: Probennahmehöhe, Musterprobe und verwendete Werkzeuge für die Kambiumprobe an Sommer- und Winter-Linde im April 2013

Die Extraktion der Desoxyribonukleinsäure (DNA) erfolgte nach der ATMAP-Methode (DUMOLIN ET AL 1995). Als Ausgangspunkt für die DNA-Isolierung sind die gelieferten Blatt- und Kambiumproben zerkleinert und gefriergetrocknet worden. Der DNA-Gehalt wurde stichprobenmäßig mit einem Photometer gemessen und die DNA auf 20ng/µl verdünnt. Diese Lösung stand in weiterer Folge für die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) mittels Qiagen-multiplex-Kit zur Verfügung. Für die genetischen Untersuchungen der Buche sowie der Winter- und Sommerlinde sind die in der Tab. 3.2-5 dargestellten Kernmikrosatelliten-Genorte genutzt worden. Ausgehend von den ermittelten Genotypen der Einzelbäume erfolgte die Beschreibung der genetischen Vielfalt, der genetischen Diversität und des Heterozygotiegrades. Außerdem wurde der genetische Abstand zwischen den Lindenkollektiven der einzelnen Untersuchungsflächen beschrieben (NEI 1972, 283 ff.).

⁶ Beide in den Untersuchungsflächen vorkommende Lindenarten wurden anhand der Merkmale – artspezifische Blattform, Blattunterseitenfärbung, der Blatt- und Triebbehaarung und der Form der Blattrahmung – morphologisch angesprochen.

Tab. 3.2-5: Übersicht der Kernmikrosatelliten-Genorte bei Buche sowie Sommer- und Winterlinde

	Buche	Sommer- und Winterlinde
analysierte Kernmikrosatelliten- Genorte	mfc11_blaue A1	Tc5
	FS1 -15_bl A1	Tc31
	csolf19_sw A1	Tc6
	FS3 - 04gruen A1	Tc7
	csolf 31_Grün A1	Tc4
	DE576A0 A1	Tc8
	mfc 7_schwarz A1	Tc915
	mfs11_blaue A1	Tc963
	mfc5_grün_neu A1	Tc951
	sfc0036_gr A1	Tc918
		Tc920
		Tc11

Zur Artunterscheidung wurde eine Assignment-Analyse durchgeführt. Die Auswertungen der genetischen Analysen der Buche und der beiden Lindenarten erfolgten mit dem Programm GenAlEx 6.1 (PEAKALL & SMOUSE 2012, FUSSI 2014).

3.2.6 Dendrochronologische Untersuchungen des Altbestandes

Zur Überprüfung der im Punkt 2.3 dargestellten Bestandesgeschichte wurden von jeder der drei Untersuchungsflächen den stärksten Einzelbäumen mit einem Mora-Coretax 600 mm Zuwachsbohrer für Harthölzer der Firma Haglöff ein Bohrspan (Richtung Nord-Süd) entnommen. Auf der *Kuppe* wurden insgesamt drei und auf dem *Hang* und in der *Senke* jeweils eine alte Buche abgebohrt. Am Jahrringauswerteplatz LINTAB 5 erfolgten mithilfe der Software TSAP-WinTM (<http://www.rintech.de>; Abruf 31.01.2018) das Auszählen der Jahrringe und das Aufzeichnen des jährlichen Radialwachstums.

3.2.7 Schätzung der Strahlungsverhältnisse

Strahlungsverhältnisse spielen in der Verjüngungsökologie des Waldes eine entscheidende Rolle (THORMANN 1997). Im Wald erfahren Pflanzen eine *räumliche Bestrahlung*. Das heißt, sie empfangen Strahlenenergie von allen Seiten, von oben durch das obere Blätterdach hindurch, von unten als Widerspiegelung vom Waldboden sowie der Bodenpflanzendecke und von den Seiten (KLETSCHIN 1960). In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Schätzung der aktuellen Strahlungsverhältnisse durch hemisphärische Fotoaufnahmen der Fisheye-Foto-Methode (ANDERSON 1964; WAGNER 1994). Im Buchenwald auf Muschelkalk der collinen Höhenstufe können am Waldboden vier Strahlungsjahreszeiten unterschieden werden (EHRHARDT 1988, 150 f.)

- strahlungsarmer Winter ohne Schnee am Boden,
- teilweise strahlungsreicher Winter mit Schneedecke,
- strahlungsreiches Frühjahr mit den Strahlungsmaxima im März und April und
- durch Belaubung bedingter dunkler Sommer und Frühherbst.

Mit den durchgeführten Strahlungsmessungen am 2. September 2014 und am 26. März 2015 konnten die beiden für das Wachstum der Vegetation wichtigen Strahlungsjahreszeiten

– das Strahlungsmaximum im Frühjahr und der typische durch Belaubung bedingte dunkle Sommer- bzw. Frühherbstaspekt – abgebildet werden. Unter bewölktem Himmel nimmt die relative Beleuchtungsstärke unabhängig vom absoluten Außenlicht einen konstanten Wert an, so dass auch einmalige Strahlungsmessungen brauchbare, d. h. in gewissen Grenzen reproduzierbare Werte zur Einschätzung der Lichtverhältnisse im Bestand liefern (DOHRENBUSCH 1987). Zur Schätzung der Strahlungsverhältnisse sollten diese getrennt nach direkten und diffusen Anteilen erfasst werden, da sie sich in ihrer Intensität, ihrer spektralen Zusammensetzung und ihrer Richtungsverteilung voneinander unterscheiden und beide gleichermaßen für das Pflanzenwachstum von Bedeutung sind (BRUNNER 2003). Aus diesem Grund erfolgte mit Hilfe der Bildauswertesoftware WinSCANOPY (Firma Regent Instruments Ltd.) die für das strahlungsreiche Frühjahr (Aufnahmen vom 26. März) und die durch Belaubung bedingte dunkle Sommerperiode (Aufnahmen vom 2. September) separate Berechnung des

1. „Indirect Site Factor“ (DIFFSF) in Prozent des Freiflächenwertes nach der Methode von ANDERSON (1964), der die Strahlungsverhältnisse bei vollständig bedecktem Himmel beschreibt,
2. „Direct Site Factor“ (DIRSF) in Prozent des Freiflächenwertes, der den gerichteten Strahlungsanteil von der Sonne auf eine Oberfläche (z. B. die einzelne Pflanze am Waldboden) beschreibt und in der Literatur als Sonnenflecken am Boden bezeichnet wird, und
3. „Total Site Factor“ (TOTSF) in Prozent des Freiflächenwertes, der die diffusen und direkten Strahlungsanteile mit ihrem durchschnittlichen realen Auftreten mit Hilfe der mittleren Bewölkung gewichtet.

Die Berechnung erfolgte unter der generalisierten Annahme, dass unter mitteleuropäischen Verhältnissen beide, die direkte und diffuse Strahlung, je etwa 50 % der Gesamtstrahlung erreichen (REES 1999). Dies deckt sich mit den Ergebnissen langjähriger vergleichender Messreihen in Nordbrandenburg (KALLWEIT 2015). Dabei wurde modellhaft davon ausgegangen, dass die aufgenommene Situation für die beiden Strahlungsjahreszeiten saisonal konstant ist. Die Strahlungsschätzung erfolgte über jedem der 95 Rasterpunkte (Abb. 3.2-3) unter Verwendung einer „zum Himmel“ ausgerichteten digitalen Nikon Coolpix P 5100 Kamera mit einem Super-Weitwinkelobjektiv (Fisheye) von 18 mm Brennweite mit Dosenlibelle zur Kontrolle und Gewährleistung der Horizontalausrichtung, montiert auf einem Dreibeinstativ. Zur einheitlichen Nordausrichtung der Bilder ist ein am Objektivrahmen montierter elektronischer Kompass verwendet worden. Die Aufnahmen erfolgten bei annähernd homogen bewölktem Himmel in 0,35 m Höhe über dem Waldboden. Als horizontale und vertikale Bildauflösung wurden 12 MP und 24 Bit Farbtiefe eingestellt. Die Schätzung der Strahlungsindizes erfolgte zwischen 30 Grad und 150 Grad über dem Zenit.

3.3 Primärdatenauswertung (räumliche, geostatistische und statistische Analyseverfahren)

3.3.1. Räumliche Analyseverfahren

Zur räumlichen Analyse der Bestockungsveränderungen, der Darstellung der Ergebnisse der standortsökologischen Untersuchungen (Kalktiefe, C/N-Verhältnis, N % von C, pH_{KCl}-Wert, Strahlungsschätzung), der genetischen und vegetationsökologischen Untersuchungen, einschließlich der Kartierungsergebnisse der Vegetation sowie der Visualisierung von

Zusammenhängen zwischen den standortsökologischen Detailergebnissen wurden das Geografische Informationssystem ESRI Arc GIS 10.1 sowie Quantum GIS Version 2.6.0 Brighton verwendet. Dabei kamen sowohl Geoverarbeitungswerkzeuge, wie *Vereinigen*, *Selektieren*, *Überschneiden* als auch die räumlichen Interpolationsverfahren *Inverse Distanzwichtung* (IDW) und *Krigging* zum Einsatz. Zur Vorbereitung der statistischen Auswerteverfahren erfolgte unter Nutzung des Werkzeuges *Raster-Geländeanalyse-Perspektive* der freien Software QUANTUM GIS 2.6 aus dem Amtlichen Digitalen Geländemodell 2 m die Berechnung der Exposition (Hangrichtung in Grad) sowie mit dem Werkzeug *Raster-Geländeanalyse-Relief* die Bestimmung der Hangneigung in Grad. Mittels des *Punkte-Sammeln-Werkzeugs* im QGIS 2.6.0 konnte jedem Baumfußpunkt [x (m); y (m)] und jedem Rasterpunkt des 10 m Rasters der dazugehörige Höhenwert [z (m)], seine Hangrichtung und Hangneigung, die Kalktiefe sowie die erhobenen Oberbodenwerte (pH_{KCl}-Wert, Gesamtstickstoff und Gesamtkohlenstoff) zugeordnet werden (Abb. 3.2-3).

3.3.2. Geostatistische Auswerteverfahren

Zur besseren Visualisierung der Bestockungsveränderungen wurden geostatistische Analyseverfahren, wie *Punktdichtekarten* (SILVERMAN 1986), hier interpretiert als Stammzahlen je Hektar, berechnet, die getrennt nach Versuchsfläche und Baumart, für den Ausgangszustand im Jahre 1958 (bzw. 1968) und die Wiederholungsaufnahme 2012 die lokalen Maxima sowie standörtliche Präferenzen der Baumarten Buche, Winter-Linde, Sommer-Linde und Berg-Ahorn verdeutlichen. Hierfür wurde das Werkzeug *Spezialanalyse* im Arc GIS 10.1 von ESRI benutzt. Für die Berechnung der Punktdichtekarten ist ein Radius von 10 m (Fläche ca. 0,03 ha) gewählt worden. Diese Verjüngungsgröße konnte in der ersten Wiederholungsinventur der Fläche *Hang* (RÜFFER 2007, 67 ff.) beobachtet werden. Sie entspricht der kleinsten flächigen Verjüngungseinheit (0,03 ha) der Betriebsregelungsanweisung (BRA 2000).

3.3.3. Statistische Auswerteverfahren

Als Strukturen prüfende Verfahren dienen:

- Korrelations- und Regressionsanalysen,
- Varianzanalysen
- nichtparametrischer Kruskal-Wallis-Tests

Unter Nutzung der *binären logistischen Regressionsfunktion* der Software SPSS Statistics, Version 19, wurde abschließend geprüft, welche der standörtlichen Variablen Geländehöhenwert [Z (m)], Exposition, Hangneigung und Kalktiefe die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Baumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie Berg-Ahorn im Jahre 2012 hinreichend erklären. Hierzu wurden die Flächen *Kuppe* und *Hang* zusammengefasst und die Stammverteilung der Fläche *Senke* (aufgrund des nur hier vorhandenen Einflusses wechselnder Grundfeuchte) separat berechnet.

Für die Erstellung dieser Arbeit wurde das Softwarepaket Microsoft Office 2007 (Word, Excel, Access) und für die Bearbeitung der Abbildungen die Softwareprodukte Adobe Photoshop Elements 7.0 sowie die freie Software Irfan View 64 Bit Version 4.40 verwendet.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Kartierung der Stammeigenschaften der Böden – Bestimmung der Kalktiefen

Bei den Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Hang* handelt es sich um anhydromorphe jungpleistozäne Endmoränenstandorte kräftiger bis reicher Stammtrophie mit einem flächig hohen Anteil sorptionsstarker Böden mit Kalk in für die jeweiligen Baumarten verfügbarer Tiefenstufe. Die festgestellten Bodenarten (überwiegend Tieflehm-Fahlerden, anteilig Bändersand-Braunerden und vereinzelt Sand-Braunerden und Lehm-Renzinen) schwanken, wie für einen Endmoränenstandort typisch, auf den nicht grundwasserbeeinflussten Standorten kleinräumig sehr stark. Sehr heterogene Kalktiefen wurden festgestellt (Abb.4.1-1).

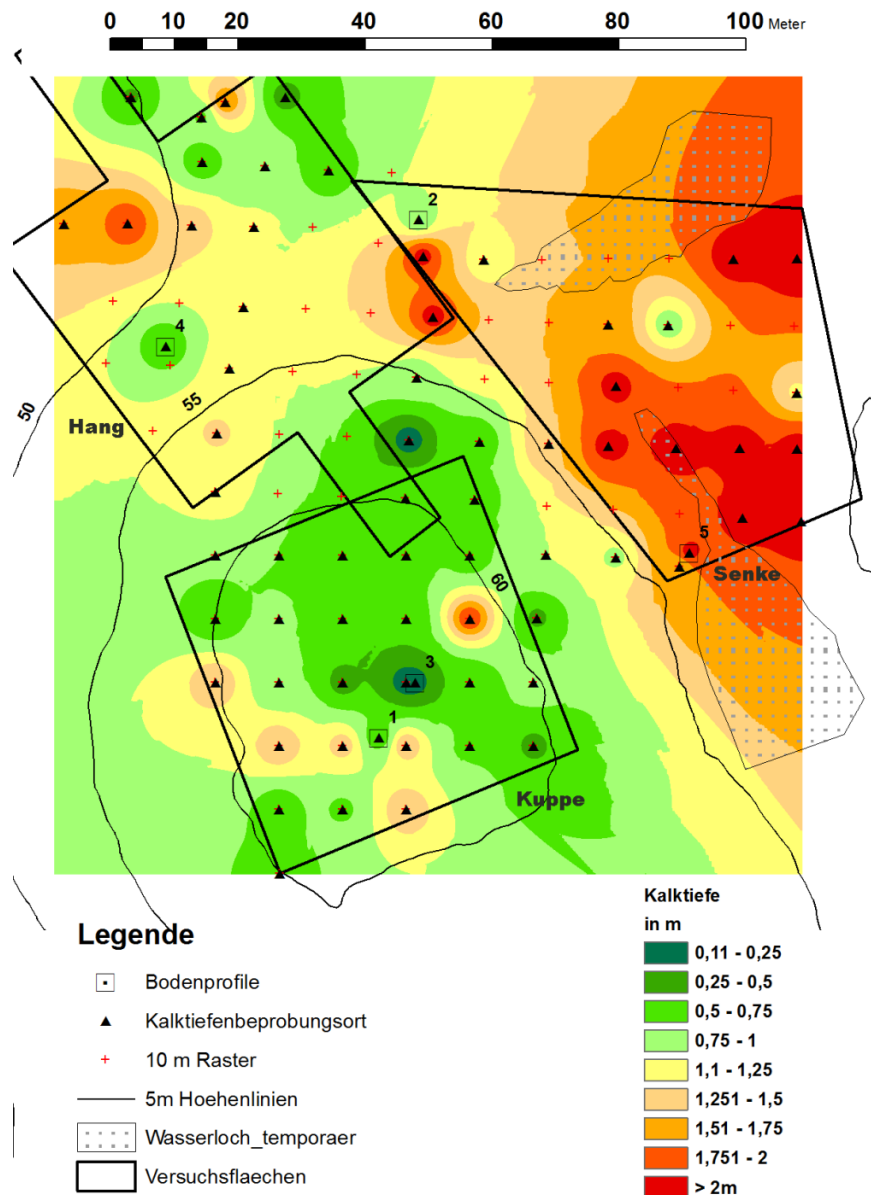


Abb. 4.1-1: Per Bohrstockprobe ermittelte und mittels Inverser Distanz Wichtung (IDW) modellierte Kalktiefen der drei Untersuchungsflächen (inklusive Darstellung der Versuchsflächen, der 5 m Höhenlinien, der fünf Bodenprofile und des systematischen 10 m Rasters)

So wurde im Zentrum der Kuppe am Bodenprofil Nummer 3, einer Lehm-Rendzina, Kalk in 13 cm Tiefe (Tiefenstufe 0,11–0,25 m) festgestellt (Abb. 4.1-1). Knapp 13 m nordöstlich von diesem Bodenprofil wurde eine Sand-Braunerde mit einer Kalktiefe unter 2 m ermittelt (Tiefenstufe > 2 m). Bodenprofil Nr. 1 (Abb. 4.1-1), eine Bändersand-Braunerde mit einer Kalktiefe von 0,55 m, ist im Jahre 1968 zur Erfassung der Standortsverhältnisse der Versuchsfläche auf der Kuppe 10 m südwestlich des Lehm-Rendzina-Profiles (Profil Nr. 3 in der Abb. 4.1-1), angelegt worden (Mansik 1971, 34; Abb. 3.2-2). Weitaus repräsentativer für die anhydromorphen Standorte sind die durch die Bohrstockerkundung für die Untersuchungsflächen Hang und Kuppe regelmäßig erfassten Tieflehm-Fahlerden mit Kalktiefen zwischen 0,55 m und 1,20 m, Bodenprofil Nummer 4 (Abb. 4.1-1).

Bei der Untersuchungsfläche *Senke* handelt es sich hinsichtlich der Stammeigenschaften um einen insgesamt wechselfeuchten Waldstandort kräftiger bis reicher Trophie mit per Bohrstockprobe festgestellten größeren Kalktiefen. Während der Erstinventur ist im Jahre 1968 das Bodenprofil Nummer 2, im Norden der *Senke*, als eine Staugley-Fahlerde reicher Stammtrophie mit einer markanten Kalkknolle bei ca. 0,80 m (Tiefenstufe 0,75 m bis 1 m) angelegt und beschrieben worden, die für den Nordteil als typisch angesehen werden kann (MANSIK 1971, 34; Abb. 4.1-1). Für den Ost- und Südteil der *Senke* ist das Bodenprofil Nummer 5 charakteristisch, eine leicht podsolierte Staugleyfahlerde mit Kalk unterhalb 2 m. Aufgrund der räumlichen Lage in einer stauwasserbeeinflussten Senke östlich der *Kuppe* mit hoch anstehendem Kalk ist davon auszugehen, dass bei wassergesättigten Böden durch Oberflächenwasser Kalk in wassergelöster Form in die Fläche transportiert wird.

Kurze Zusammenfassung

- Die Kalktiefen und Bodenarten wechseln kleinräumig sehr stark.
- Typisch für die nicht grundwasserbeeinflussten Flächen *Kuppe* und *Hang* sind *Tieflehm-Fahlerden* mit für die Baumarten erreichbaren Kalktiefen zwischen 0,55 m und 1,20 m.
- In der grundfeuchten *Senke* haben sich Staugley-Fahlerden gebildet. Die Kalktiefen bewegen sich bei einem beobachteten Nord-Süd-Gefälle zwischen 0,8 m und > 2 m.
- Bei wassergesättigten Böden wird Kalk oberflächennah hangabwärts in die *Senke* und den Unter-*Hang* transportiert.

4.2 Waldkundliche Aufnahmen von Bestandesstruktur und Vegetation

4.2.1 Rekonstruktion des historischen Waldzustandes (1958 und 1968)

30 Jahre nach der Aufgabe der forstlichen Bewirtschaftung ist die von *Holz-kamm* im Jahre 1958 angelegte und bestandesstrukturell erfasste Fläche auf der *Kuppe* als Altbaum-Hallenstadium anzusprechen (JENSSEN & HOFMANN 1996, 114 ff.; Abb. 4.2-1 und 4.2-4).

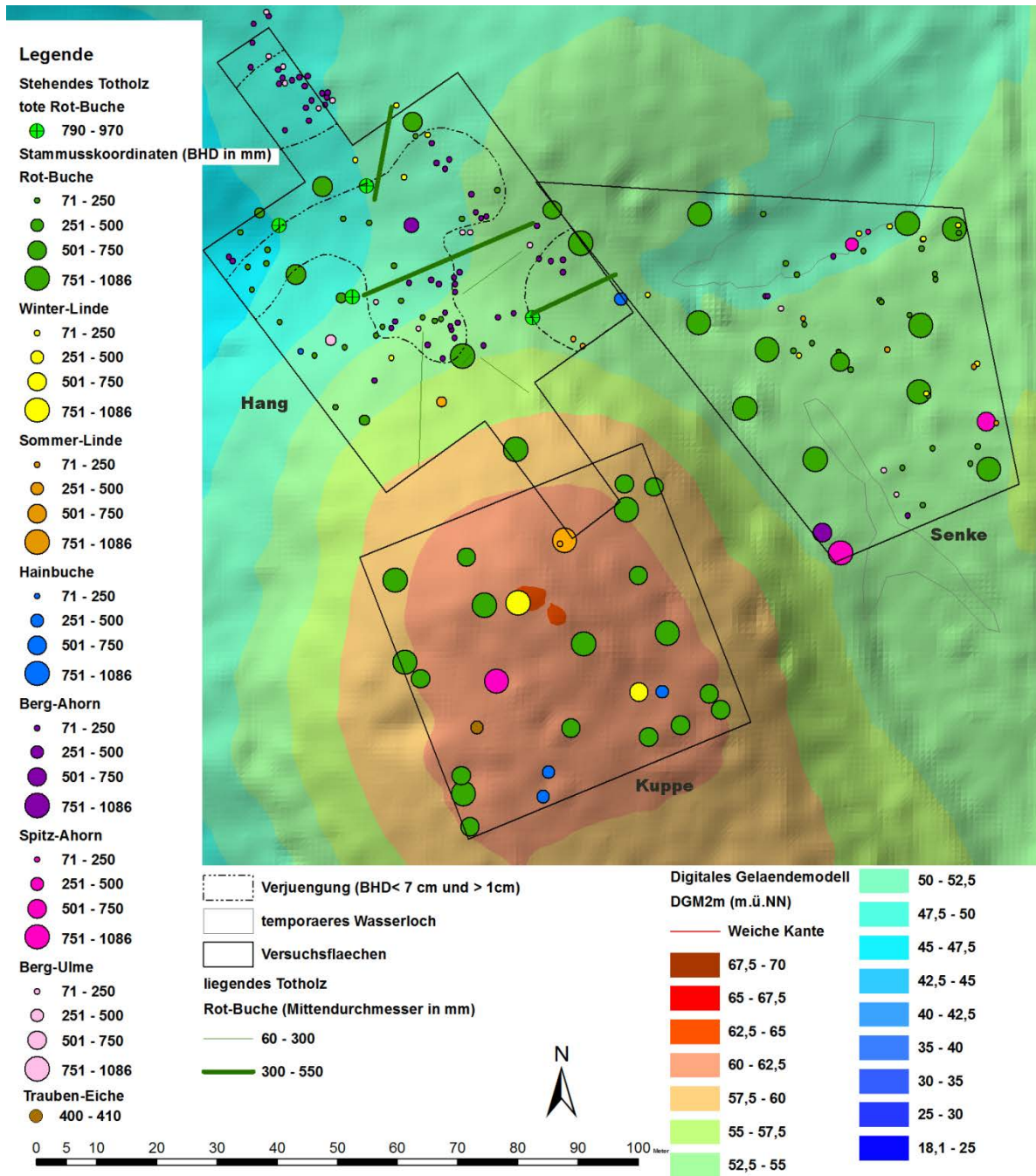


Abb. 4.2-1: Stammverteilungspläne der Erstinventuren aus dem Jahre 1958 (verändert nach HOLZKAMM 1959, 37 ff.), *Kuppe* (unten) und *Senke* (rechts) und dem Jahre 1968 (verändert nach MANSIK 1971, 73) des *Hangs* (oben links). Mit baumartenspezifischer farblicher und zugleich durchmesserabhängiger Kreisflächengrößen-Darstellung, hinterlegt mit den farblich skaliert wiedergegebenen Höhenstufen des Amtlichen DGM 2 m.

Die 1958 in der östlich vorgelagerten *Senke* eingerichtete Fläche befindet sich bereits im Übergang vom Altbaum-Hallenstadium zum beginnenden Disintegrations- und Formierungsstadium (HOLZKAMM 1959, 40 f.). In der zehn Jahre später, im April 1968, aufgenommenen Untersuchungsfläche auf dem (Nordwest)-*Hang* ist mit den ersten vier abgestorbenen Altbuchen (grüne Kreisfläche mit grauem Kreuz), liegendem Totholz und der zahlreichen Naturverjüngung von Buche (kleine dunkelgrüne Kreisflächen) und Berg-Ahorn (kleine violette Kreisflächen) im Unter- und Mittelteil des *Hangs* der Übergang in das Disintegrations- und Formierungsstadium vollzogen (MANSIK 1971, 73). Lediglich im Südteil der Fläche, am Oberhang, dominiert noch das Altbaum-Hallenstadium⁷, welches Ende der 1930er Jahre flächig vorherrschte (Abb.4.2-2).



Abb. 4.2-2: Hallenstadium im Faulen Ort am Unteren Weg, westlich der *Kuppe* (SCHOENICHEN 1938, Tafel 19)

⁷ Zum Zeitpunkt der Erstinventur der Flächen *Kuppe* und *Senke* im Jahre 1958 zeichnete sich auch die Fläche *Hang* durch eine hallenwaldartige Bestockung aus. Dies ist einem Luftbildpaar vom 06. 09. 1960 (Quelle Bilder 12 und 13 des Films 118 - 60 der Luftbildsammlung des Bundesarchiv Berlin) entnehmbar, das eingescannt, georeferenziert, entzerrt und am Stereobildschirm ausgewertet wurde. Aufgrund der sehr schlechten Bildqualität wird hier auf eine Wiedergabe verzichtet.

Auf allen drei Flächen wird zum Zeitpunkt der Erstinventur der Oberstand von der Baumart Buche beherrscht (dunkelgrün gefärbter Kreis in der Abb. 4.2-1). Die Buchenalthölzer sind gleichmäßig in den drei Untersuchungsflächen verteilt. Bestockungsunterschiede zwischen den drei Flächen gibt es in den Dimensionen des von der Buche beherrschten Oberstandes, was sich in den differenzierten Durchmessern und Höhen der Grundflächenmittelstämme des Buchenoberstandes widerspiegelt (Abb. 4.2-3; Tab. 4.2-1).

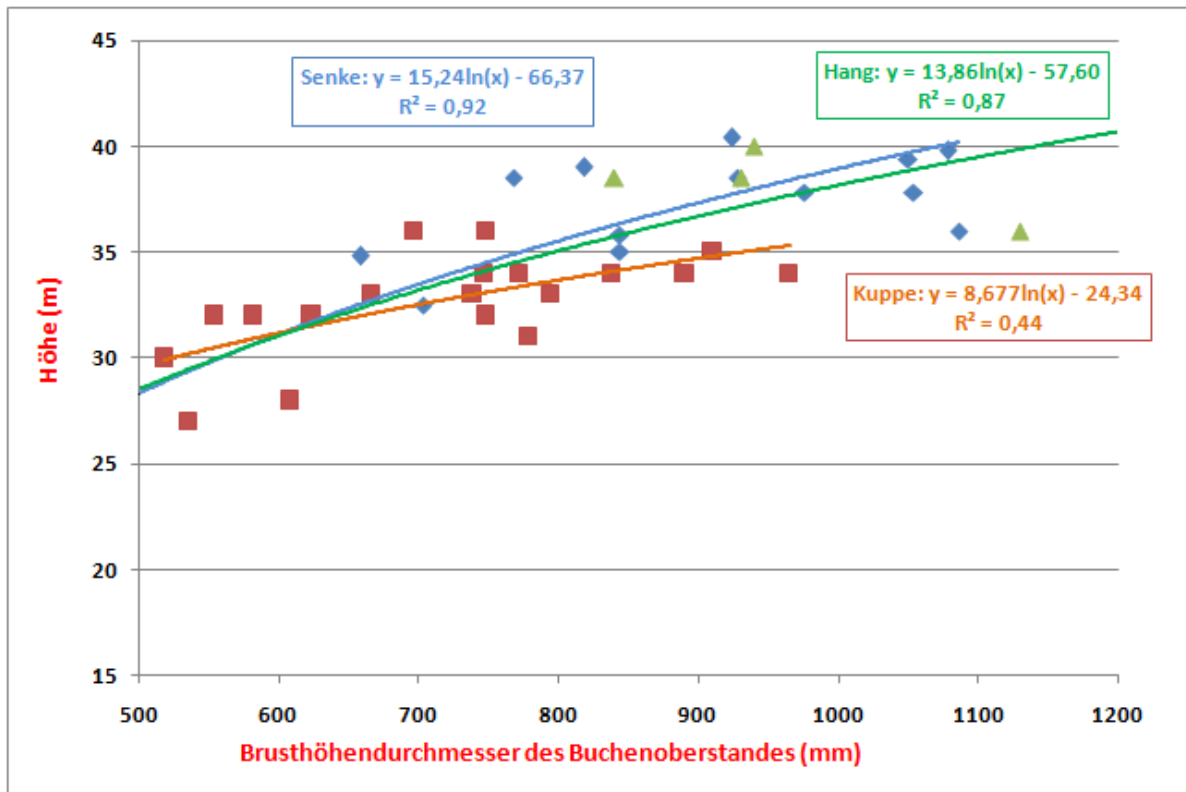


Abb. 4.2-3: Gegenüberstellung der Durchmesser-Höhen-Beziehungen der durch Buchen gebildeten Oberstände in den Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* zum Zeitpunkt der Erstinventur

Die Baumhöhen und die Baumdurchmesser des auf der *Kuppe* überwiegend aus Buchen gebildeten Oberstandes bleiben mit etwa 4–6 m im Höhenwachstum und mit 20 cm bis 30 cm im Durchmesserzuwachs deutlich hinter den in der *Senke* und am *Hang* gemessenen Werten zurück. Bestockungsunterschiede sind auch hinsichtlich der Vorräte (Tab. 4.2-1) und der Bestandesschichtung (Abb. 4.2-6) vorhanden. Geringe Unterschiede bestehen in den Mischbaumartenanteilen (Abb. 4.2-1).

Tab. 4.2-1: Ausgewählte holzmesskundliche Werte (Erstinventur)

Fläche	Durchmesser des DG (Grundflächenmittelstamm) des Buchenoberstandes	Höhe über dem DG des Buchen- oberstandes	Variationsbreite der Höhen des Oberstandes	Vorrat je ha in m ³ Derbholz
<i>Hang</i>	101,9 cm	39 m	36,0–42,0 m	348
<i>Senke</i>	91,3 cm	37,8 m	32,5–40,4 m	705
<i>Kuppe</i>	73,2 cm	32,5 m	28,0–36,0 m	742

Auf der *Kuppe* sind neben den 19 Altbuchen (dunkelgrüne Kreise, Stärkeklassen 5 bis 9) mit einer Trauben-Eiche (hellbrauner Kreis), einem Spitz-Ahorn (hellroter Kreis), drei Hainbuchen (dunkelblauer Kreis) sowie je zwei Sommer-Linden (dunkelgelber Kreis) und zwei Winter-Linden (hellgelber Kreis) mit fünf Mischbaumarten die im Vergleich der drei Flächen höchste Artenanzahl im Altbestand vorhanden. Baumartennaturverjüngung fehlt (Tab. 4.2-2).

Tab. 4.2-2: Baumartenzusammensetzung der Untersuchungsflächen (Erstinventur)

Fläche	Anzahl der jeweiligen Baumindividuen des Oberstandes/Zwischenstandes In Klammern gesetzt des Unterstandes							
	Buche	Hainbuche	Winter-Linde	Sommer-Linde	Trauben-Eiche	Spitz-Ahorn	Berg-Ahorn	Berg-ulme
<i>Hang</i>	5/4 (20)	1 (–)	– (7)	1 (2)	– (–)	–	7 (46)	1/4 (6)
<i>Senke</i>	13 (24)	1	– (7)	1 (5)	–	2	1 (3)	–
<i>Kuppe</i>	19	3	2	2	1	1	–	–

In der *Senke* stockten im Jahre 1958 neben den 13 Altbuchen (dunkelgrüne Kreise, Stärkeklassen 6–10) vier Mischbaumarten im Oberstand; zwei Exemplare des Spitz-Ahorns (hellroter Kreis), ein Berg-Ahorn (violetter Kreis), sowie je eine starke Sommer-Linde (dunkelgelber Kreis) und eine Hainbuche (blauer Kreis), unter denen sich durch Naturverjüngung 24 junge Buchen (dunkelgrüner Kreis), sieben Winter-Linden (hellgelber Kreis), fünf Sommer-Linden (dunkelgelber Kreis) und drei Exemplare des Berg-Ahorns etabliert haben (Abb. 4.2-1). Der Bestockungsaufbau kann als zweischichtiger buchendominierter Bestand beschrieben werden (HOLZKAMM 1959, 27). Mit je einer Sommer-Linde (dunkelgelber Punkt) und Hainbuche (dunkelblauer Punkt), vier Berg-Ulmen (blassrosa Punkt) sowie sieben Exemplaren des Berg-Ahorns (violetter Punkt) haben sich in der von fünf Buchen (dunkelgrüne Punkte der Stärkeklassen 7–12) beherrschten Fläche *Hang* ebenfalls vier Mischbaumarten im Zwischen- und Oberstand etabliert (Abb. 4.2-1, oben links). Unter ihnen haben sich bereits 1968 flächig im Mittel- und Unterhang auf etwa 40 % der 50 m x 50 m Kernfläche die Mischbaumarten Berg-Ahorn, Berg-Ulme und Winter-Linde sowie die Buche im Unterstand verjüngt und sind mit den stärksten Exemplaren in die Wuchsklasse schwaches Stangenholz eingewachsen (Abb. 4.2-1). Ein stammzahlreicher Verjüngungshorst mit einem Bruthöhendurchmesser kleiner 1 cm ist hangaufwärts im Südosten der Fläche vorhanden.

4.2.1.1 Überschirmungsgrad und Vegetationshöhenmodell (zum Zeitpunkt der Erstinventur)

Die anhand der Stammverteilungspläne der Erstinventuren herausgearbeiteten unterschiedlichen Waldentwicklungsphasen in den drei Flächen spiegeln sich auch im Grad der Homogenität der terrestrisch durchgeführten Kronenschirmflächenablotungen (Abb. 4.2-4 und Tab. 4.2-3) sowie im Vegetationshöhenmodell von 1970 (Abb. 4.2-6) wider: Mit 81 % Überschirmungsgrad auf der *Kuppe*, 83 % in der *Senke* und 82 % auf dem *Hang* (bezogen auf die 50 m x 50 m Kernfläche) ist der ermittelte Gesamtüberschirmungsgrad zwar annähernd gleich. Im Unterschied zu den Flächen *Kuppe* und *Senke* setzt sich die Kronenschirmfläche des im Disintegrations- und Formierungsstadium befindlichen

Bestandes auf dem *Hang* jedoch nur zu etwa 73 % durch Kronenflächen von Bäumen mit einem Bruthöhendurchmesser größer 7 cm zusammen (Abb. 4.2-1). Auf 40 % der Fläche ist eine Überschirmung durch Bäume der Unterschicht mit einem Bruthöhendurchmesser kleiner 7 cm festzustellen. Verjüngungskomplexe (stammzahlreiche Naturverjüngungstrupps und -gruppen) nehmen 10 % der Überschirmungsfläche ein (MANSIK 1971, 73).

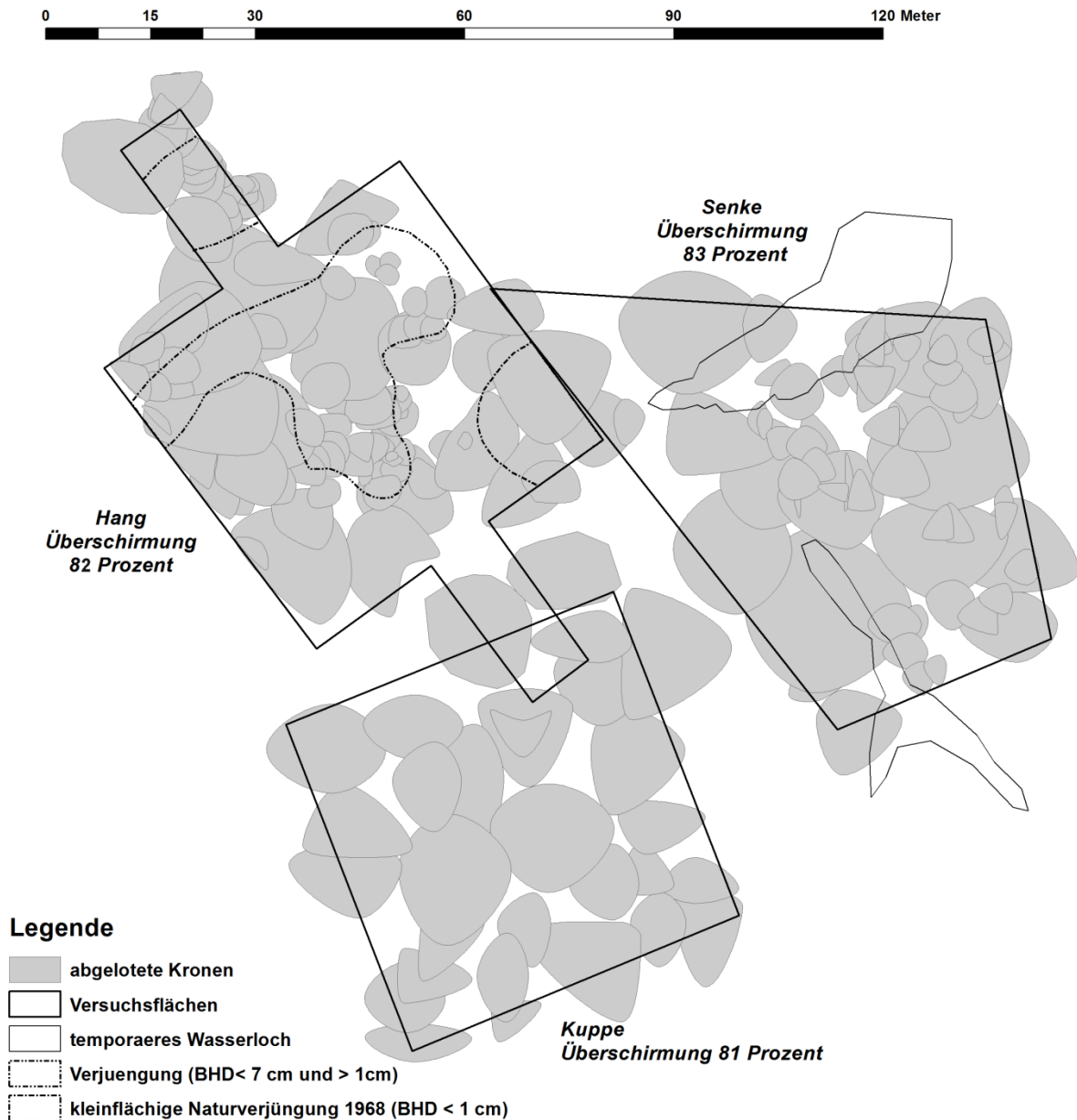


Abb. 4.2-4: Darstellung der aus den Originalgrundrissen der Erstinventuren der Untersuchungsflächen rekonstruierten Kronenschirmflächen (verändert nach MANSIK 1971, 73)

Dies ist im Luftbild vom 16. Juni 1970 an der vergleichsweise großen Anzahl an Lücken im Kronendach der Untersuchungsfläche *Hang* zu erkennen (Abb. 4.2-5).

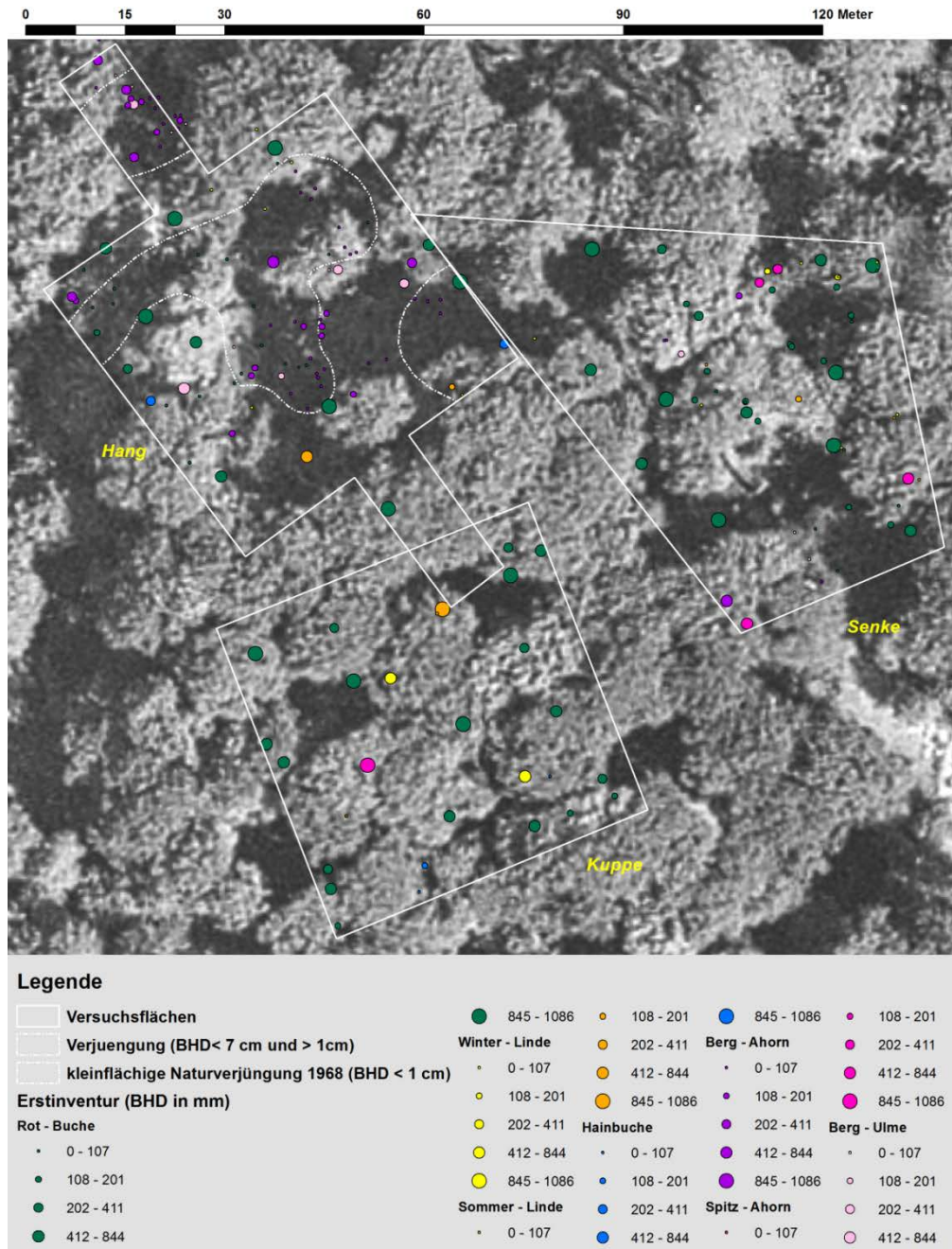


Abb. 4.2-5: Georeferenziertes und entzerrtes Luftbild aus dem Jahre 1970 mit den eingezeichneten räumlichen Umrissen der Untersuchungsflächen, der Stammfußkoordinaten und Verjüngungsgruppen der Erstinventuren. Luftbildquelle: Bundesarchiv Berlin, Film Nr. C 154266 - 70 Bild Nr. 140, Flug vom 16.6.1970

Die aus den terrestrischen Kronenablotungen der Erstinventur, insbesondere der unterschiedlichen Kronenformen und Größenverhältnisse, geschlussfolgerte Beschreibung des Bestandeszustandes lässt sich auch durch das Vegetationshöhen- bzw. Baumhöhenmodell, errechnet aus den beiden überlappenden Luftbildern 139 und 140 vom Juni 1970, nachweisen (Abb. 4.2-6): Erkennbar an der (fast) gleichförmigen orangen bis roten Farbsignatur (Höhen von 30 m bis 40 m), befindet sich der Bestand auf der *Kuppe* im Hallenwaldstadium. Lücken sind nicht erkennbar, einzelne Baumkronen ragen gleichmäßig verteilt heraus und die Baumhöhen nehmen nach Süden der Fläche hin leicht ab. In der

Senke wird das Kronendach der herrschenden Bäume durch Lücken in der räumlichen Nähe zu den beiden temporären Wasserlöchern (im Norden und Süden) unterbrochen. In diesen sind die in den Abb. 4.2-1 und 4.2-4 eingezeichneten Verjüngungsgruppen (Unterschicht) vorhanden.

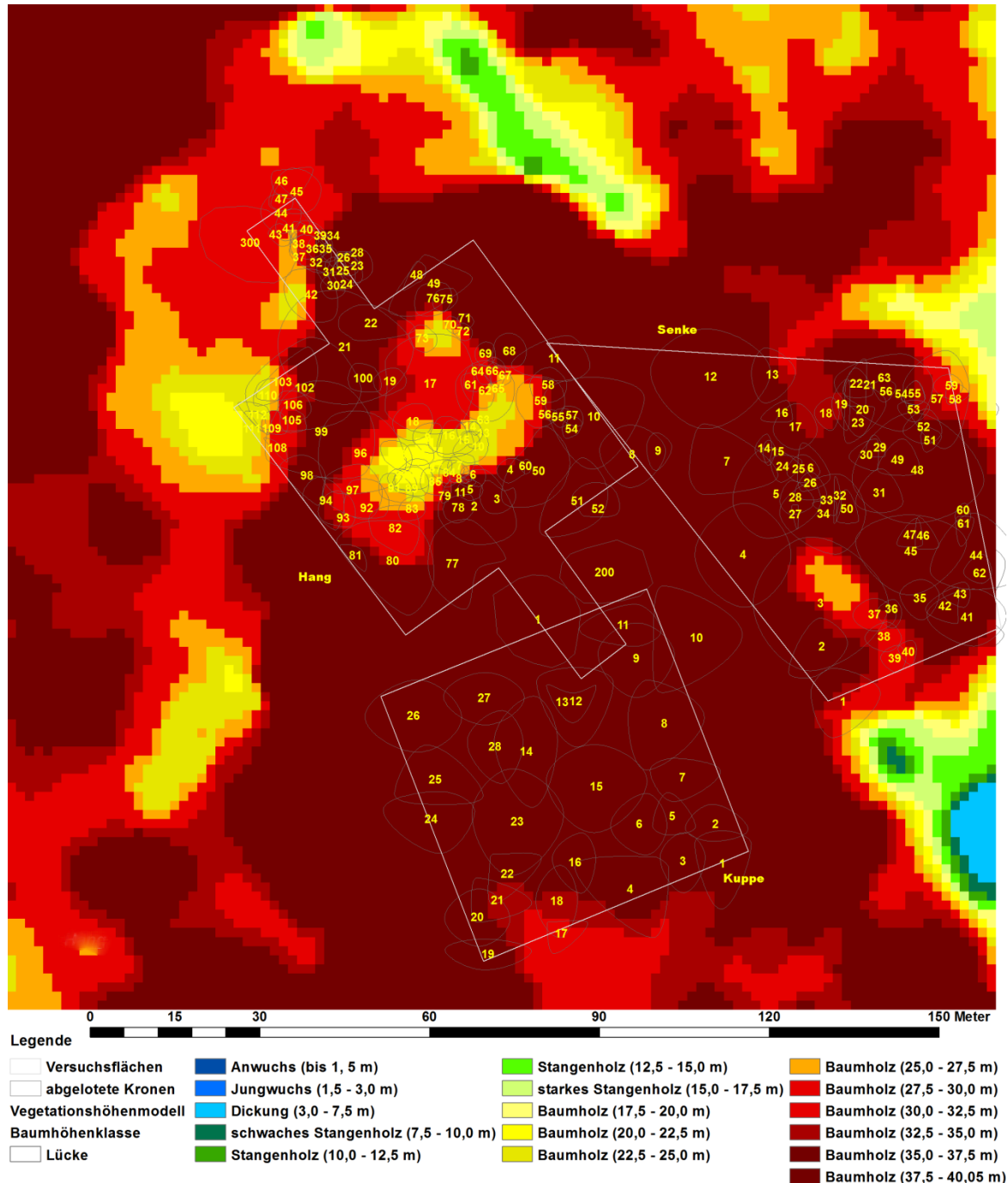


Abb. 4.2-6: Zweidimensionales Vegetationshöhenmodell (Baumhöhe über Grund) klassifiziert als Baumhöhenklasse für das Jahr 1970, gerechnete Pixelauflösung 1,6 m, errechnet aus den Luftbildern 139 und 140 des Luftbildfilms C 154266 - 70 vom 16.6.1970 mit Darstellung der räumlichen Umrisse der drei Untersuchungsflächen, der terrestrischen Kronenablotungen sowie der Baumnummern (Luftbildquelle: Bundesarchiv Berlin)

In der quadratischen 50 m x 50 m Kernfläche der Fläche *Hang* existiert zu diesem Zeitpunkt nur noch ein Restvorrat des herrschenden Oberstandes von Bäumen größer 31 m in Form einer Flächenumrandung, die nach Südwesten, im Bereich des Mittelhanges, bereits offen ist. Kennzeichnend für das Vegetationshöhenmodell des *Hanges* ist eine etwa die Hälfte der Kernfläche einnehmende Kronendachlücke, in der sich stammzahlreiche Verjüngung befindet (Abb. 4.2-1 und 4.2-4). Eine weitere Lücke befindet sich im Norden. Diese waldentwicklungsbedingten Unterschiede des Bestandeszustandes der Versuchsflächen zeigen sich auch an den berechneten Kronenschirmflächen: Erwartungsgemäß weisen die Bäume der *Kuppe* mit einem Mittelwert von 103,3 m² und dem Medianwert von 86,2 m² Kronenschirmfläche im Vergleich zu den beiden anderen Untersuchungsflächen homogene, mittlere bis große Kronen auf, charakteristisch für das Altbaum-Hallenstadium.

Tab. 4.2-3: Übersicht über die Kronenschirmflächenwerte (einzelbaum- und flächenspezifisch) der drei Untersuchungsflächen (Erstinventur)

Kronenschirmfläche	<i>Hang</i>	<i>Kuppe</i>	<i>Senke</i>
Minimum [m ²]	1,97	28,6	3,4
Maximum [m ²]	366,4	221,3	413,4
Mittelwert [m ²]	40,7	103,3	63,75
Median [m ²]	20,9	86,2	21,3
Kronenschirmfläche [m ²] aller lebenden Bäume	2463,5	2026,7	2361,4
Überschirmungsgrad [%]	82,1	81,1	83,2

In der *Senke* nehmen im Vergleich zur *Kuppe* aufgrund der eingesetzten Baumartenverjüngung (Beginn des Disintegrations- und Formierungsstadium) die Extremwerte zu, aber sowohl der Mittelwert als auch der Medianwert der Kronenschirmflächen ab. Die Vielzahl kleinerer Kronen der Unter- und Zwischenschicht (im Zentrum der Kernfläche) der Fläche *Hang* werden durch den vergleichsweise kleinsten mittleren Kronenschirmflächenwert von 40,7 m² und den geringen Medianwert von 20,9 m² bestätigt und verdeutlichen das vielfältige Nebeneinander von unterschiedlich großen Baumindividuen im Disintegrations- und Formierungsstadium (Tab. 4.2-3).

4. 2. 1. 2. Vegetationsverhältnisse zum Zeitpunkt der Erstaufnahme

Bei der Erstinventur der Bestockung in den beiden Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Senke* wurde die Vegetation nicht kartiert. Stattdessen verwies der Autor auf die ein Jahr zuvor im Waldschutzgebiet *Fauler Ort* flächige Kartierung und beschrieb anhand dieser Karte den Vegetationszustand in seinen beiden Untersuchungsflächen (SCAMONI 1957, 55 ff.). Diese Karte wurde aktuell digitalisiert und georeferenziert (Abb. 4.2-7). Demnach stockte Mitte der 1950er Jahre auf allen drei Untersuchungsflächen der reiche Bingelkraut-Buchen-Traubeneichenwald (*Melico-Fagetum-balticum mercurialietosum*), der, beginnend im Nordwesten der Kuppenfläche, hangabwärts in den Buchenhangwald (*Melico-Fagetum dentarietosum*) überging (HOLZKAMM 1959, 11). MANSIK (1971, 38 f.) kartierte im Jahre 1969 die Stationen 13 (*Senke*) und 14 (*Kuppe*) (Abb. 3.2-2). Er ordnet alle drei Untersuchungsflächen der reichen Untergesellschaft *Melico-Fagetum-pulmonarietosum* der Assoziation der Perlgras-Buchenwälder (*Melico-Fagetum*) innerhalb des Verbandes der

eutrophen Buchenwälder zu (SCAMONI 1960). Kennzeichnend für diese reiche Untergesellschaft ist u.a. das Auftreten von Bingelkraut (*Mercurialis perennis*), Giersch (*Aegopodium podagraria*), Vierblättriger Einbeere (*Paris quadrifolia*), Gelbem Busch-Windröschen (*Anemone ranunculoidis*), Scharbockskraut (*Ranunculus vicaria*) und Moschuskraut (*Adoxa moschatellina*). In Bezug auf die Vegetationsverhältnisse in den beiden Flächen Kuppe und Senke äußert er sich wie folgt: „Die standörtlich bedingte Individualität der beiden [...] Untersuchungsstationen 13 und 14 [...] zeigt sich im Vegetationsbild darin, daß bei der Station 14 [Untersuchungsfläche Kuppe, Anm. d. Verf.] auf einer Moränenkuppe [...] in der Bodenvegetation neben den die Subassoziation bestimmenden Arten das gehäufte Auftreten von *Poa nemoralis* eine trockenere Ausbildung repräsentieren. Bei der Station 13 [Untersuchungsfläche Senke, Anm. d. Verf.] unter leichtem Staunässeseinfluß treten diese Arten stark zurück oder fehlen" (MANSIK 1971, 38).



Abb. 4.2-7: Ausschnitt aus der Vegetationskarte des Waldschutzgebietes *Fauler Ort* (verändert nach SCAMONI 1957, 55 ff.) nachträglich georeferenziert mit eingezeichneter Lage der drei Untersuchungsflächen

Kurze Zusammenfassung

- Alle drei Untersuchungsbestände entstanden aus einem Eichenwald, in dem nach Nutzung der Trauben-Eichen die Buche gleichmäßig verteilt den Oberstand beherrschte; einzelne Exemplare von Mischbaumarten sind jeweils beigemischt.
- Mitte der 1950er Jahre wurde ein reicher *Bingelkraut-Buchen-Traubeneichenwald* (*Melico-Fagetum-balticum mercurialietosum*) kartiert, der hangabwärts in einen Buchenhangwald (*Melico-Fagetum dentarietosum*) überging.
- Das *Altbaum-Hallenstadium* war zum Zeitpunkt der Erstinventuren dominierend.
- Eine erste große Bestandeslücke auf dem *Hang* und zwei kleinere in der *Senke* zeigen den Beginn des *Disintegrations- und Formierungsstadiums* an.
- Das Vegetationshöhenmodell aus dem Jahre 1970 und die berechneten Einzelbaum-Kronenschirmflächen widerspiegeln die waldentwicklungsbedingten Unterschiede der drei Bestände.

4.2.2 Waldkundliche Aufnahme der Flächen in der Wiederholungsinventur 2012

Charakteristisch für das Bestandesbild im Jahre 2012 ist in allen drei Untersuchungsflächen ein kleinflächiger, überwiegend trupp- bis gruppenweiser⁸ Wechsel von Buchen (dunkelgrüne Kreise), Winter-Linden (hellgelbe Kreise), Sommer-Linden (dunkelgelbe Kreise) und Exemplaren des Berg-Ahorns (violette Kreise). Einzelne Exemplare der Hainbuche (dunkelblaue Kreise), des Spitz-Ahorns (hellrote Kreise), der Gemeinen Esche (türkisfarbene Kreise), der Berg-Ulme (hellrosafarbener Kreis) und Rot-Erle (brauner Kreis) sind beigemischt (Abb. 4.2-8).

Die Waldbestände haben sich auf allen drei Flächen in den vergangenen fünf Jahrzehnten durch ein Durchlaufen des Disintegrations- und Formierungsstadiums, des Jungwuchs- oder Dickungsstadiums zum Jungbaum- oder Stangenholzstadium und teilweise bis zum beginnenden Baum-Hallenstadium weiterentwickelt. Am weitesten fortgeschritten in der Waldentwicklung ist der vergleichsweise homogene Bestand in der *Senke* mit dem stattgefundenen Einwachsen der Hauptteile der neuen Waldgeneration in das beginnende Baum-Hallenstadium (Tab. 4.2-4; 4.2-5; 4.2-6).

⁸ truppweise (bis 0,03 ha, 9,77 m Radius); gruppenweise (bis 0,1 ha, 17,84 m Radius); horstweise (ab 0,11 ha bis maximal 0,3 ha, ab 17,84 m Radius; BRA 2000)

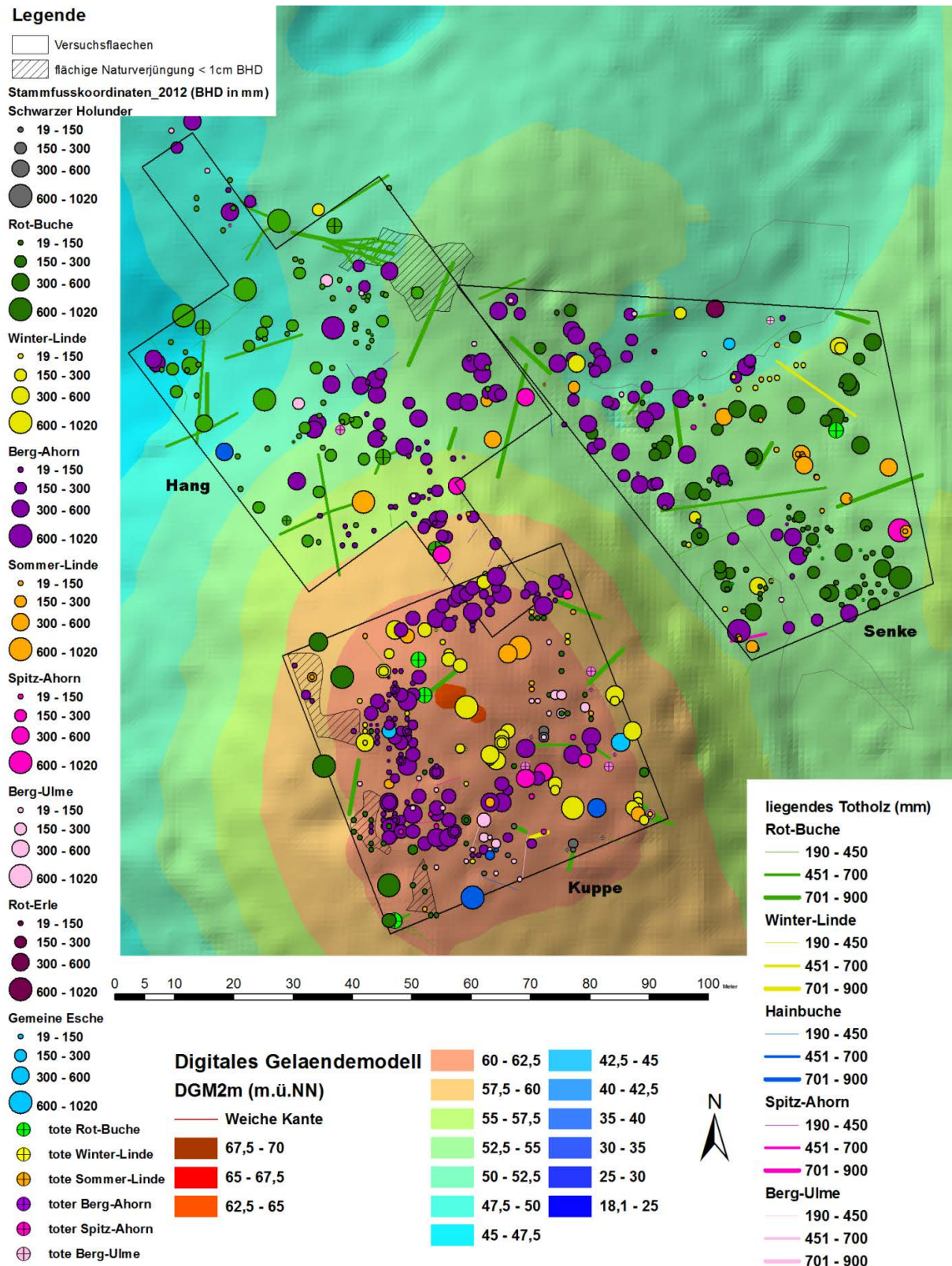


Abb. 4.2-8: Stammverteilungsplan der Wiederholungsinventuren im Jahre 2012 – *Kuppe* (unten), *Senke* (rechts) und *Hang* (oben links) mit Darstellung des Amtlichen DGM 2 m. Angabe der Durchmesserklassen (der jeweiligen Baumart) in mm

Dies ist visuell an der hier durchgängig gelb bis ockerfarbenen Signatur der Baumhöhenklassen (Baumholz-Höhenklasse 17,5 m bis 27,5 m) der Abb. 4.2-9 erkennbar.

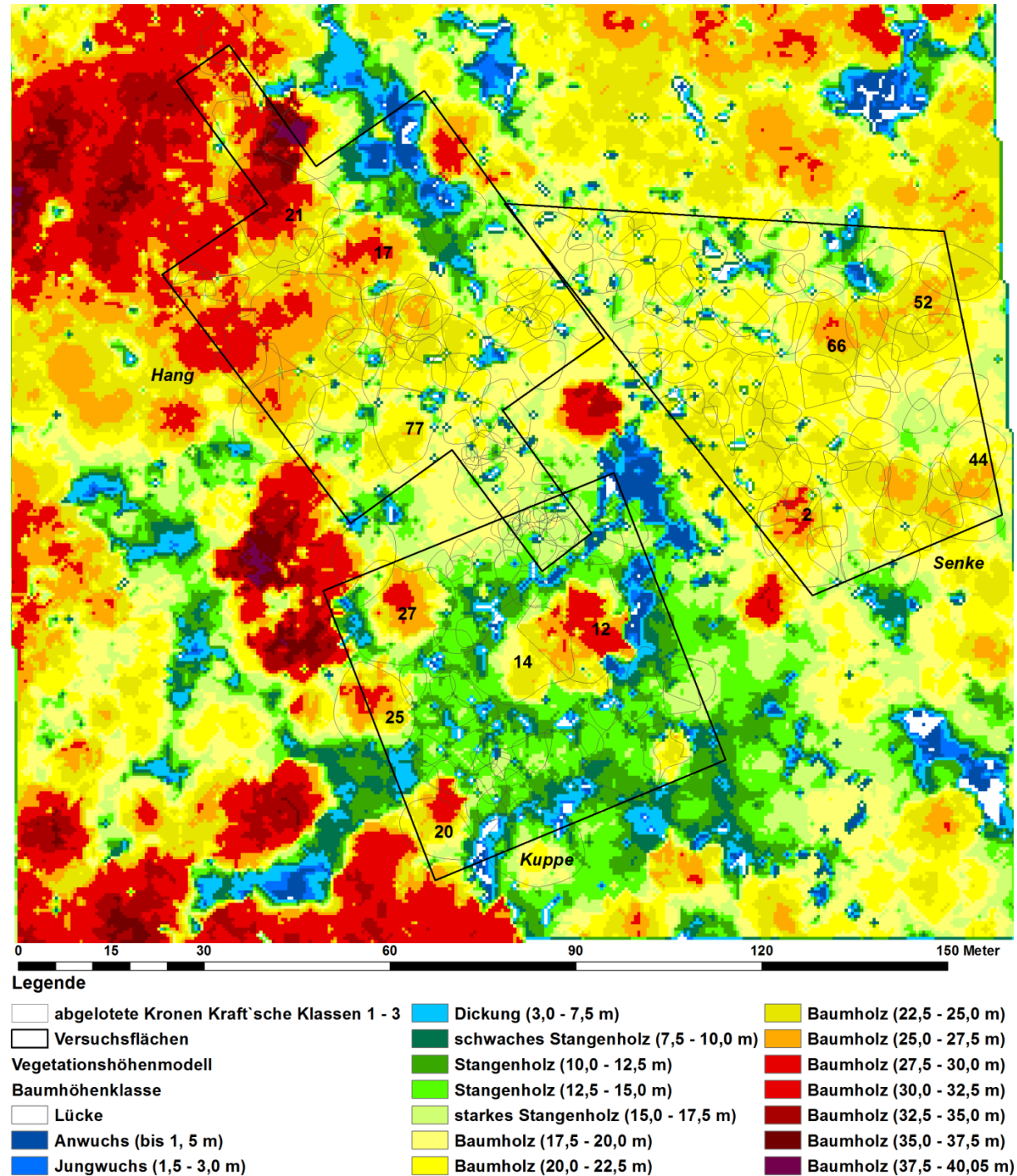


Abb. 4.2-9: Zweidimensionale Darstellung des Vegetationshöhenmodells (Pixelauflösung 1 m), daraus abgeleiteten Baumhöhenklassen für das Jahr 2012 mit Einblendung der durch terrestrische Ablotungen erfassten Kronenschirmflächen der Bäume der Kraft'schen Klassen 1–3 und der Baumnummern markanter Einzelbäume (Datenquelle: Laserdaten first und last pulse Landesbetrieb Geobasis Brandenburg 2012)

Schlanke Stämme mit überwiegend schmalen, wenig verzweigten Kronen, insbesondere des vorwüchsigen Berg-Ahorns und der (fast) gleichwüchsigen Buche entstanden in diesem Eschen-Buchenwaldökosystem der Untersuchungsfläche *Senke* (Abb. 4.2-10). Ausdruck dafür sind die im Vergleich zu den beiden anderen Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Hang* homogenen, kleineren Kronen mit durchschnittlich 31,7 m² Kronenschirmfläche

(Tab. 4.2-7). Stangenholzdimensionen sind hier nur mit ca. 16 % an der Kronenschirmfläche der Fläche vertreten (Tab. 4.2-6).

Tab. 4.2-4: Ausgewählte holzmesskundliche Kennwerte der Wiederholungsinventur 2012

Fläche Waldökosystemtyp	Durchmesser des DG (Grundflächenmittelstamm)	Höhe des DG	Vorrat in m ³ /ha
<i>Hang</i> Bingelkraut-Buchenwald/ Bingelkraut-WLI-Buchenwald	28 cm	23 m	338
<i>Senke</i> Eschen-Buchenwald	26 cm	22 m	430
<i>Kuppe</i> Bingelkraut-WLI-Buchenwald	20 cm	19 m	483

Einen ähnlichen Waldentwicklungszustand weisen die Bestandesteile im Mittelhangbereich der Fläche *Hang* auf. Auch diese gehören den Baumhöhenklassenbereichen 20,0 m bis 27,5 m an (Abb. 4.2-8 und 4.2-9). Dabei zeichnet sich dieser Waldbestand gegenwärtig durch eine geländehöhenstufenabhängige Dreigliederung der Waldentwicklungsphasen – erkennbar an den Wuchsklassen – aus (Abb. 4.2-8): Der Ober-*Hang* ist dem Jungbaum- oder Stangenholzstadium zuzuordnen (hellgrüne Farbe in der Abb. 4.2-9) mit etwa 19 % Flächenanteil. Er entspricht dem vorherrschenden Waldentwicklungszustand der benachbarten Fläche *Kuppe* (Tab. 4.2-6 sowie Abb. 4.2-8, 4.2-9 und 4.2-11). Ausdruck dafür sind die vergleichbaren Kronenschirmindizes der Flächen *Hang* und *Kuppe*, die mit einem Maximalwert von um die 250 m², einem Mittelwert von 41,4 m² bzw. 44,8 m² und einem Medianwert von knapp über 20 m² miteinander vergleichbare Dimensionen aufweisen (Tab. 4.2-7). Der Mittel-*Hang* ist mit ähnlichen Baumholzdimensionen und homogenen Kronenschirmflächen wie in der benachbarten Fläche *Senke* dem beginnenden Baum-Hallenstadium zuzurechnen. Im Unter-*Hang* klingt das Disintegration- und Formierungsstadium aus. Dies ist an wenigen sehr hohen Baumindividuen und den hier vorhandenen sehr heterogenen Kronenschirmflächen erkennbar (Tab. 4.2-5 sowie Abb. 4.2-8 und 4.2-9).



Abb. 4.2-10: Panoramaaufnahme des Bestandes in der *Senke*, Blick von Nord nach Süd vom Juli 2016



Abb. 4.2-11: Panoramaaufnahme des Bestandes auf dem *Hang*, Blick von Nord nach Süd vom Juli 2016



Abb. 4.2-12: Panoramaaufnahme Fläche *Kuppe*, Rundumblick von der Bestandesmitte vom Juli 2016

Tab. 4.2-5: Vergleichende Darstellung des flächenbezogenen und baumartenspezifischen Grundflächenmittelstammes (DG) der Verjüngungsgruppen ohne Einbeziehung des Restvorrats in der Wiederholungsinventur 2012

Fläche Waldökosystemtyp	Berg-Ahorn		Buche		Winter-Linde		Sommer-Linde	
	BHD [cm]	Höhe [m]	BHD [cm]	Höhe [m]	BHD [cm]	Höhe [m]	BHD [cm]	Höhe [m]
Hang Bingelkraut-Buchenwald/ Bingelkraut-WLI-Buchenwald	25	22	22	22	–	–	25	22
Senke Eschen-Buchenwald	28	25	23	22,5	19	17	19	17
Kuppe Bingelkraut-WLI-Buchenwald	13	16	8	11	14	14	10,5	11

Tab. 4.2-6: Prozentuale Kronenschirmflächenanteile der Wuchsklassen in den drei Untersuchungsflächen zum Zeitpunkt der Wiederholungsinventur 2012, berechnet aus dem klassifizierten Vegetationshöhenmodell (Abb. 2.1-23).

Fläche Waldökosystem Wuchsklasse	Hang <i>Bingelkraut-Buchenwald/ Bingelkraut-WLI-Buchenwald</i>	Kuppe <i>Bingelkraut-WLI- Buchenwald</i>	Senke <i>Eschen- Buchenwald</i>
Lücke	7,7	8,3	4,1
Anwuchs	0,7	0,5	0,2
Jungwuchs	0,4	0,3	0,1
Dickung	1,6	4,3	0,4
Stangenholz	19,3	65,6	16,0
Baumholz ⁹	70,2	20,9	79,2

Zeitlich in der Walderneuerung den Beständen des *Hangs* und der *Senke* nachlaufend, befindet sich die Bestockung auf der *Kuppe*. Hier dominiert gegenwärtig mit 66 % Kronenschirmflächenteil das Jungbaum- oder Stangenholzstadium (Tab. 4.2-4, 4.2-5, 4.2-6 und Abb. 4.2-8, 4.2-9 und 4.2-13). Knapp 4 % der Kronenschirmfläche dieser Untersuchungsfläche befindet sich noch im Jungwuchs- oder Dickungsstadium. Mit 8 % Flächenanteil ist in dieser Fläche der Lückenanteil recht hoch (Tab. 4.2-6). Dies spiegelt sich auch in dem im Flächenvergleich geringsten Überschirmungsgrad wider (Tab. 4.2-7).

⁹ In der Fläche *Hang* werden die Höhenklassen bis 39,3 m durch Baumindividuen belegt, in den beiden Flächen *Kuppe* und *Senke* nur bis zur Höhenklasse 35 m.



Abb.4.2-13: Stangenholz in der Westhälfte der Fläche *Kuppe* (Foto vom Juli 2016)

In allen drei Untersuchungsflächen ist ein Restvorrat der Ausgangsbestockung von 1958 und 1968 in Gestalt weniger starker Baumholz-Überhälter noch vorhanden (zwei Buchen im Unterhang des *Hangs*; eine Buche, ein Spitz- und ein Berg-Ahorn in den erhöhten Bestandespartien im Süd- und Ostteil der *Senke* sowie drei Buchen, zwei Winter- und eine Sommer-Linde sowie zwei Hainbuchen von 21 % Kronenschirmflächenanteil auf der *Kuppe*), die das Auslaufen des Disintegrations- und Formierungsstadiums anzeigen, erkennbar an der dunkelroten Farbsignatur im Vegetationshöhenmodell (Abb. 2.1-23).

Tab. 4.2-7: Kennwerte der Kronenschirmflächen der Wiederholungsinventur 2012

Fläche Waldökosystem Kronenschirmfläche	Hang <i>Bingelkraut-Buchenwald/ Bingelkraut-WLI-Buchenwald</i>	Kuppe <i>Bingelkraut-WLI- Buchenwald</i>	Senke <i>Eschen- Buchenwald</i>
Minimum [m ²]	2,7	7,5	1,8
Maximum [m ²]	245,5	257,2	131,9
Mittelwert [m ²]	41,4	44,8	31,7
Median [m ²]	20,3	22	24,9
Kronenschirmfläche der sozial herrschenden Bäume [m ²]	2347,8	1743,1	2022,6
Überschirmungsgrad [%] Kraft'sche Klassen 1–3	78,3	69,7	71,3

4.2.2.1 Vergleichende Analysen des Höhenwachstums der Buche

Das Höhenwachstum der Buchen im Oberstand der drei Untersuchungsflächen zeigte bereits zum Zeitpunkt der Erstinventuren flächenspezifisch ein unterschiedliches Leistungsvermögen (Abb. 4.2-3). Deshalb lag es nahe, auch in der Wiederholungsinventur sowohl das flächenspezifische Höhenwachstum der Buchen untereinander als auch in Bezug zu den wichtigsten Mischbaumarten zu untersuchen. Die bereits im Hinblick auf die erreichten Baumhöhen- und Baumdurchmesserdimensionen der im Oberstand befindlichen Buchen zum Zeitpunkt der Erstinventuren festgestellten Unterschiede spiegeln sich auch im differenzierten Höhenwachstum der neu hinzugekommenen Buchen wider (Abb. 4.2-14).

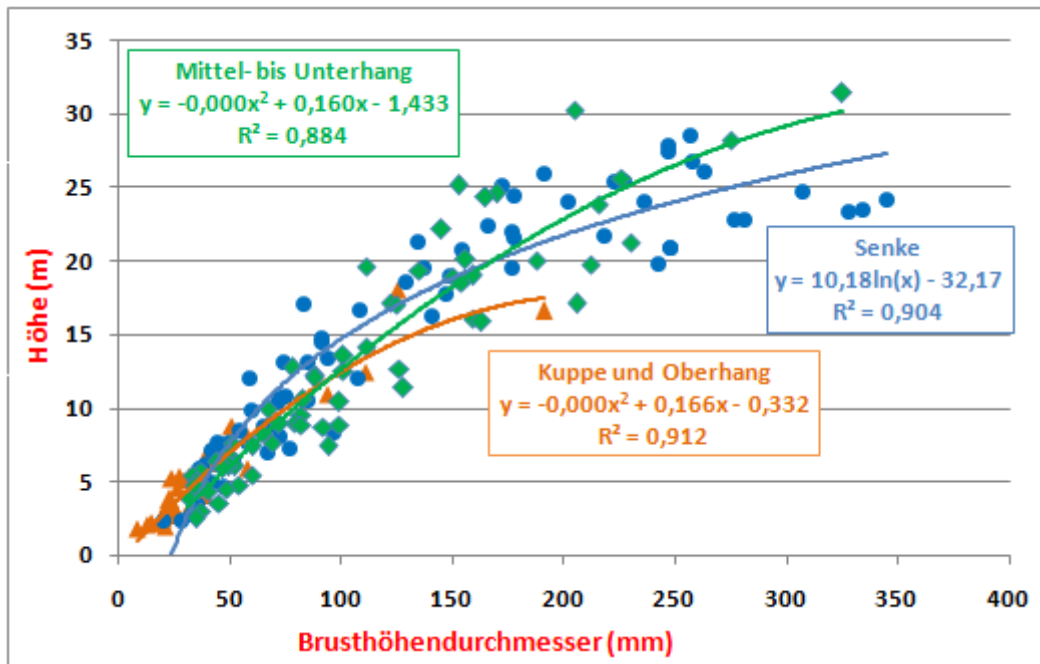


Abb. 4.2-14: Darstellung der flächenspezifischen Durchmesser-Höhen-Beziehungen der Buchen im Unter- und Zwischenstand der drei Untersuchungsflächen

Das Höhenwachstum der Buche auf der *Kuppe* und dem *Ober-Hang* verläuft im Vergleich zur *Senke* sowie dem *Unter-* und *Mittel-Hang*, deren Wachstumskurven etwa gleichauf verlaufen, deutlich gebremst (**Abb. 4.2-14**). Vor allem das verzögerte Höhenwachstum der Buche bewirkte, dass die Mischbaumarten Winter-Linde, Sommer-Linde neben und unter dem vorverjüngten Berg-Ahorn mit dem Wachstum der Buche auf der *Kuppe* und den oberen Teilen der Fläche *Hang* mithalten können (**Abb. 4.2-15**).

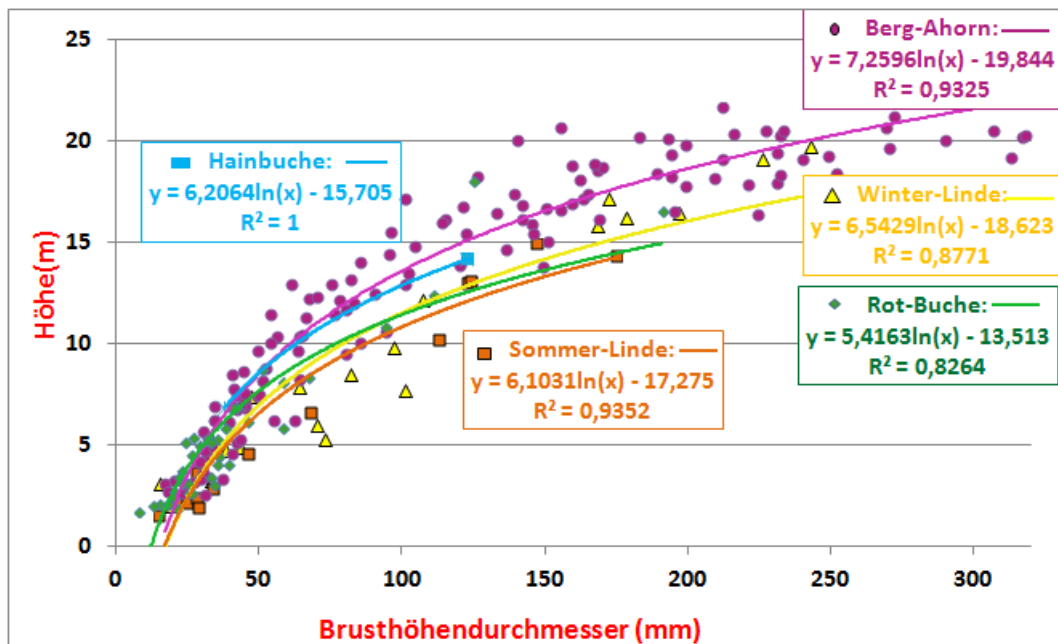


Abb. 4.2-15: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung im Binkelkraut-Winterlinden-Buchenwald der Flächen *Kuppe* und *Ober-Hang*

Hainbuche und Berg-Ahorn zeigen im gegenwärtigen Waldzustand bei gleichem Brusthöhendurchmesser ein im Vergleich zur Buche steileren Höhenwachstumsverlauf (Abb. 4.2-15). Es bildeten sich aufgrund der geschwächten Höhenkonkurrenzkraft der Buche auf der *Kuppe* und dem *Ober-Hang* „echte Mischbestände“ aus Buche, Hainbuche, Winter- und Sommer-Linde, vorwüchsigem Berg-Ahorn sowie einzelnen Exemplaren des Spitz-Ahorns sowie der Gemeinen Esche heraus (Abb. 4.2-8). Die Höhe des jeweiligen Grundflächenmittelstammes der Baumarten Berg-Ahorn und Winter-Linde (sie liegt in beiden Fällen gegenwärtig über dem der Buche) und die der Sommer-Linde (sie entspricht dem der Buche) bestätigen das (Tab. 4.2-5). Eine andere Situation ist in der *Senke* und dem Mittel- bis *Unter-Hang* festzustellen: Das vergleichsweise schon in der Abb. 4.2-14 erkennbare konkurrenzstärkere Höhenwachstum der Buche im Unter- bis Mittel-*Hang* bewirkte ein in der Verjüngung realisiertes Überwachsen der hier vorhandenen Mischbaumarten Berg-Ahorn und Berg-Ulme (Abb. 4.2-16).

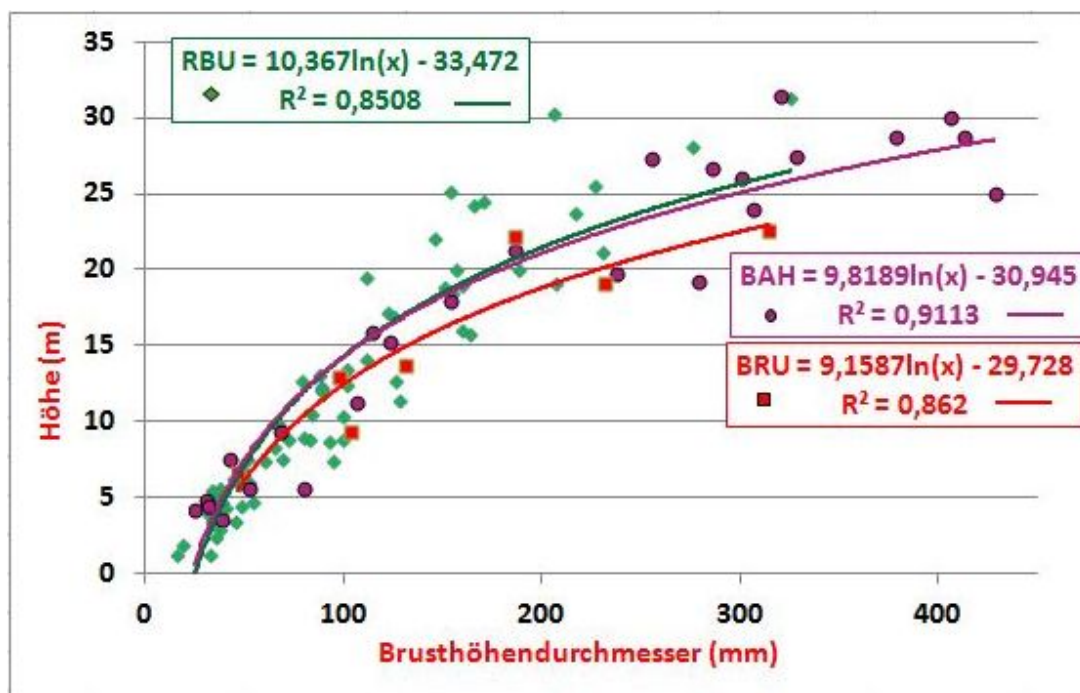


Abb. 4.2-16: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung im Unter- bis Mittel-*Hang* (RBU = Buche; BAH = Berg-Ahorn; BRU = Berg-Ulme)

Auch in der durch periodischen Grundwassereinfluss stehenden *Senke* weist die Buche auf den ihr zusagenden, höher gelegenen Standorten einen im Vergleich zur Sommer- und Winter-Linde steileren Höhenwachstumsverlauf auf (Abb. 4.2-17 und Tab.4.2-5). Bei gleichem Brusthöhendurchmesser beträgt der Höhenvorsprung der Buche gegenüber den beiden Lindenarten etwa vier Meter und bewegt sich auf dem Niveau des Spitz- und Berg-Ahorns (Abb. 4.2-17). Den Höhenvorsprung gegenüber den beiden Lindenarten kann die Buche jedoch nur auf den kleinflächig vorhandenen höchsten Standorten realisieren, was den an vergleichsweise höhere Grundwasserstände angepassten Mischbaumarten Berg-Ahorn, Gemeine Esche und vor allem Winter-Linde Ausbreitungschancen eröffnet, auf die in den Unterkapiteln 4.2.5 und 4.2.7 sowie der Abb. 4.2-36 näher eingegangen wird.

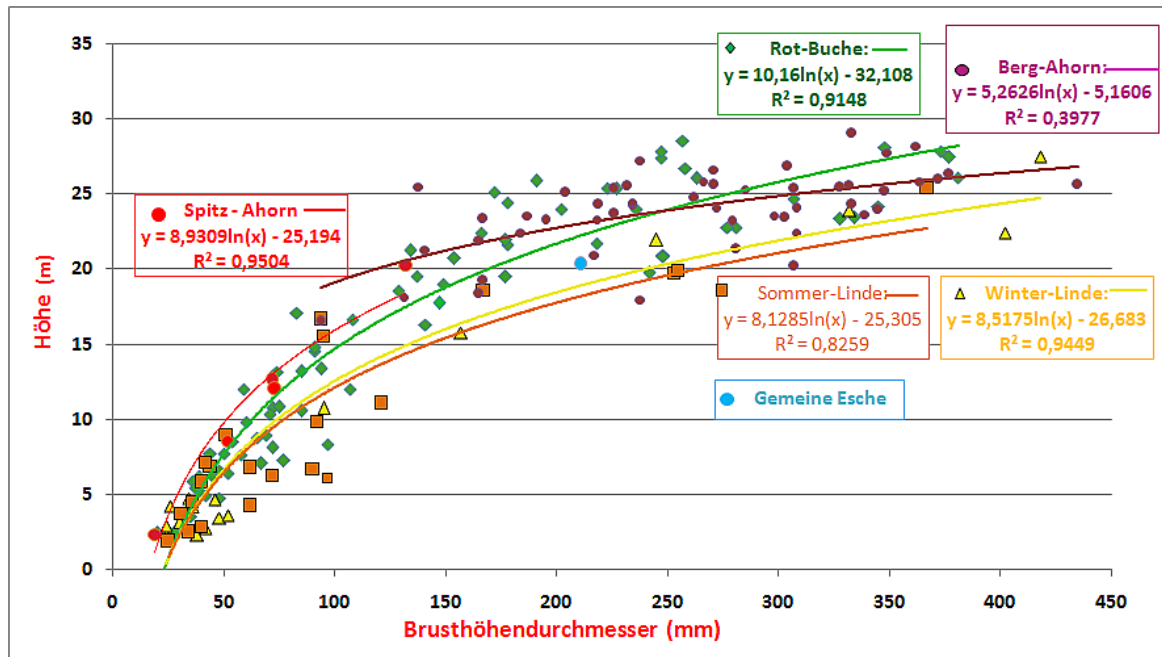


Abb. 4.2-17: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung im Eschen-Buchenwald der *Senke*

Kurze Zusammenfassung

- Der Bestand hat sich bis zum Jahre 2012 weitestgehend erneuert, aus den ehemals buchendominierten Waldbeständen zum Zeitpunkt der Erstinventur ist ein kleinflächiger, überwiegend trupp- bis gruppenweiser Wechsel von Buchen, Winter- und Sommer-Linden und Exemplaren des Berg-Ahorns entstanden. Einzelne Hainbuchen, Exemplare des Spitz-Ahorns, der Gemeinen Esche, Berg-Ulme und Rot-Erle sind beigemischt.
- Der Berg-Ahorn hatte eine Pionierfunktion inne, wenige Überhälter der alten Waldgeneration sind noch vorhanden.
- Die drei Bestände unterscheiden sich standörtlich (insbesondere mikroklimatisch) bedingt in der Baumartenzusammensetzung.
- Der Bestandeswandel ist in den drei Flächen unterschiedlich schnell verlaufen, am weitesten ist die Entwicklung in der *Senke* und dem Unter-*Hang* vorangeschritten.
- Dies ist am flächenspezifischen Durchmesser- und Höhenwert des Grundflächenmittelstamms sowie den aus dem Vegetationshöhenmodell ermittelten Wuchsklassenanteilen erkennbar.
- Das bestandesweise Höhenwachstum der Buche auf der *Kuppe* und dem Ober-*Hang* verläuft im Vergleich zu *Senke* und Unter-*Hang* deutlich gebremst.
- Infolgedessen können hier Mischbaumarten (Winter- und Sommer-Linde) im Höhenwachstum mit der Buche mithalten oder sie (wie Hainbuche und Berg-Ahorn) sogar übertreffen.
- Auf dem Unter-*Hang* überwächst die Buche die Mischbaumarten Berg-Ahorn und Berg-Ulme.
- In der grundfeuchten *Senke* meidet die Buche die tieferen Standorte. Sie besiedelte vor allem die höher gelegene Bestandespartien und hat hier einen Wuchsvorsprung gegenüber den anderen Mischbaumarten.

4.2.3 Auswertung der Luftbildzeitreihe 1960 bis 2012

Zum Verständnis des zeitlichen Ablaufs des Zusammenbruchs der alten, in den Erstinventuren der drei Untersuchungsflächen erfassten Baumgeneration wurden georeferenzierte und entzerrte Luftbilder in das Geografische Informationssystem Arc GIS importiert und die Stammfußkoordinaten und Verjüngungsinselfen der Erstinventuren (und im Luftbild aus dem Jahre 1978 das liegende Totholz der Aufnahme aus dem Jahr 1968) lagerichtig eingezeichnet (Abb. 4.2-1). Aus dieser Luftbildzeitreihe 1960–1970–1973–1978–1991 ergibt sich folgendes Gesamtbild:

Zwischen dem 6. September 1960 (ältestes vorliegendes Luftbild in sehr schlechter Qualität) und dem 16. Juni 1970 (Abb. 4.2-5) entstanden durch den Zusammenbruch weniger alter Buchen im Zentrum der 50 m x 50 m Repräsentationsfläche der *Kuppe* große Lücken, im Kronendach, die nicht mehr geschlossen werden konnten. Sie kennzeichnen als diagnostisches Merkmal, sogenannte *Stöckerlücken*, den Beginn des Disintegrations- und Formierungsstadiums (JENSSEN ET AL. 2003). Bereits im Luftbild aus dem Jahr 1960 sind Lücken im Norden und Süden der *Senke* in der Nähe des temporären Wasserloches erkennbar. Das Kronendach des Waldbestandes auf der *Kuppe* ist sowohl 1960 als auch 1970 geschlossen (Abb. 4.2-5). Das Vegetationshöhenmodell von 1970 als dreidimensionale Abbildung beschreibt diesen Waldzustand sehr anschaulich. Erkennbar an der (fast) gleichförmigen orangen bis roten Farbsignatur (Höhen von 30 m bis 40 m) befindet sich die *Kuppe* im Hallenwaldstadium. Lücken sind nicht erkennbar, einzelne Baumkronen ragen gleichmäßig verteilt heraus und die Baumhöhen nehmen nach Süden und zum Zentrum der Fläche hin leicht ab.

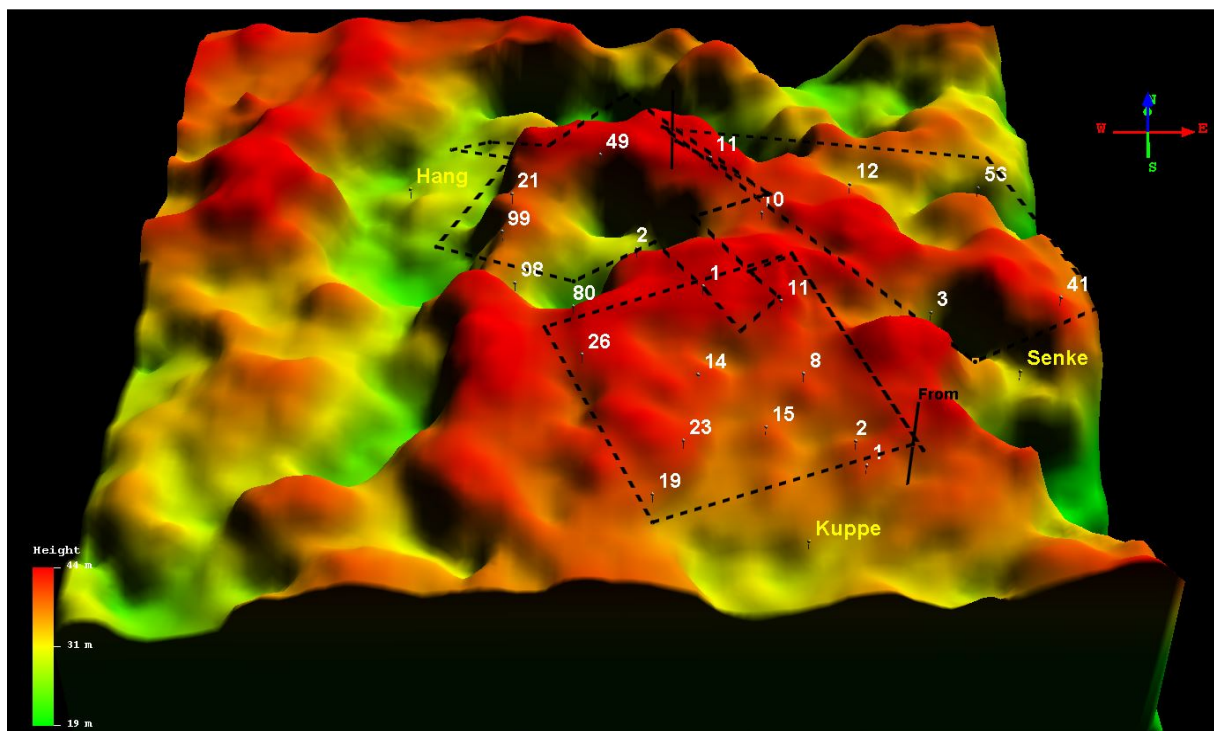


Abb. 4.2-18: Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell (Pixelauflösung 1,6 m) im Jahre 1970, dargestellt mittels QT Reader mit den räumlichen Umrissen der drei Untersuchungsflächen und markanten Baumnummern, errechnet aus den Luftbildern 139 und 140 des Luftbildfilms C 154266-70 vom 16.6.1970 (Luftbildquelle: Bundesarchiv Berlin). In Rottönen wiedergegeben sind Baumhöhen zwischen 35 m und 41 m

Wahrscheinlich hervorgerufen durch die beiden Orkanereignisse vom 13. November 1972 und 3. Januar 1976, die bei vorherrschender Westwindlage mit Windgeschwindigkeiten von über 150 km/h verheerende Windwurfschäden im Norddeutschen Tiefland anrichteten, kam es zu ersten Kronenabbrüchen und Windwürfen des Bestandes auf der *Kuppe* und zu weiteren Auflösungserscheinungen in den Flächen *Hang* und *Senke* (Abb. 4.2-19, rechts). Im Luftbild von 1973 treten Kronendachlücken im Süden, Westen und Nordosten der *Kuppe* auf. In der *Senke* nehmen im Norden und auf dem *Hang* im Süden (auf dem Oberhang) die Lückengrößen im Kronendach zu, vergleiche Abb. 4.2-19. Die Ursache sind Windwürfe und Kronenbrüche, die im Luftbild im winterkahlen Zustand vom 30. März 1978 erkennbar sind (Abb. 4.2-20). Zahlreiche gebrochene und geworfene Stämme liegen um und in den drei Untersuchungsflächen – erstmals auch auf der *Kuppe*. Besonders hoch ist der Anteil liegenden Totholzes westlich der *Kuppe*, einem West-Prallhang. Durch die Einzeichnung des in der Erstinventur im Jahre 1968 kartierten liegenden Totholzes ist ein Zugewinn an Totholz auch am *Hang* erkennbar (MANSIK 1971, 73). Schließlich zeigt das Schwarz-Weiß-Luftbild des Kronenzustandes vom 23. Mai 1987, trotz des schlechten Erhaltungszustandes und grober Auflösung im Vergleich zum Kronenbild der Jahre 1970 und 1973, das Fortschreiten der Auflösungserscheinungen des buchendominierten Oberstandes der *Kuppe* (Abb. 4.2-21, links). Im Vergleich dazu erscheint der Kronenzustand im Color-Infrarot-Luftbild aus dem Jahre 1991 in der zweidimensionalen Darstellung als wenig verändert (Abb. 4.2-21, rechts).

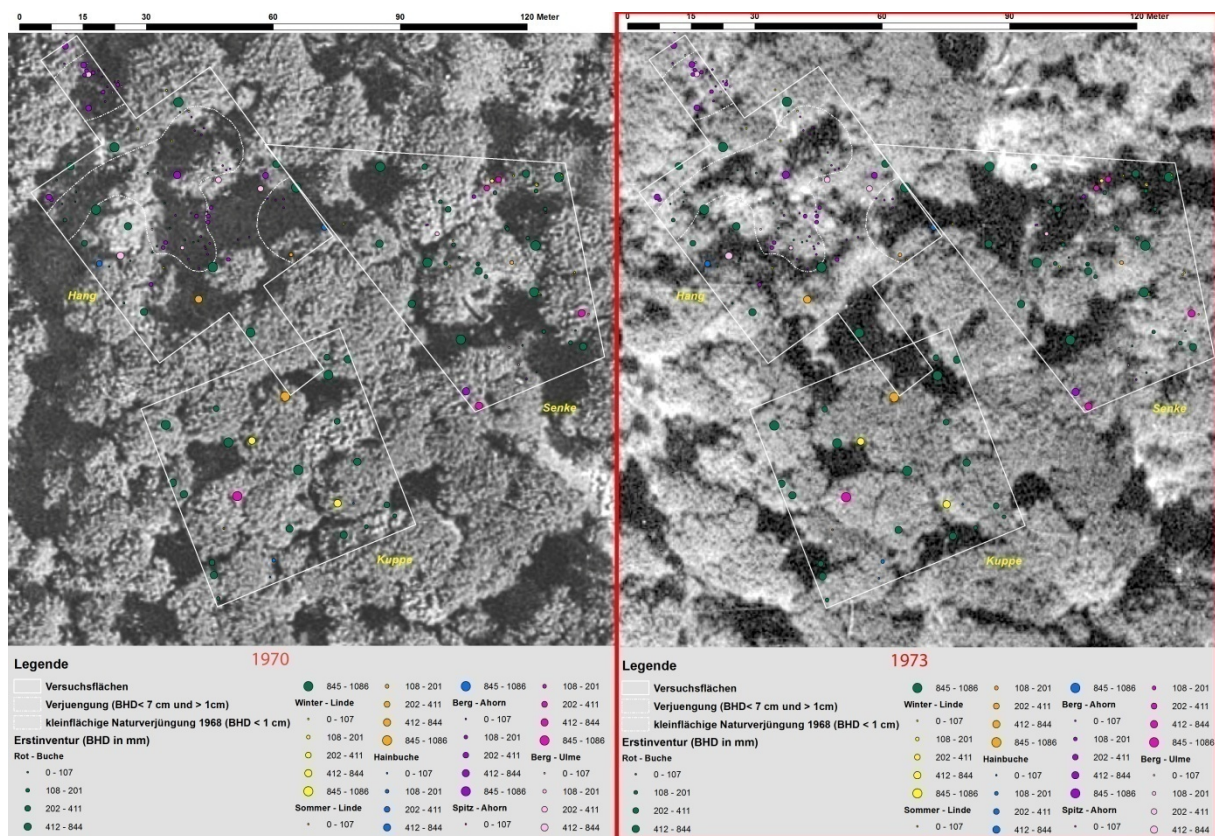


Abb. 4.2-19: Vergleichende Darstellung der eingescannten, georeferenzierten und entzerrten Luftbilder vom 16.6.1970 (links, gerechnete Pixelauflösung 0,2 m) und 30.05.1973 (rechts, Pixelauflösung 0,3 m) mit eingezeichneten Grenzen der Untersuchungsflächen und den Stammfußkoordinaten sowie Verjüngunginseln der Erstinventuren (Luftbildquelle: Bild 140 des Luftbildfilms C 154266-70 und Bild 74 des Luftbildfilm C 253614-73 Bundesarchiv Berlin)

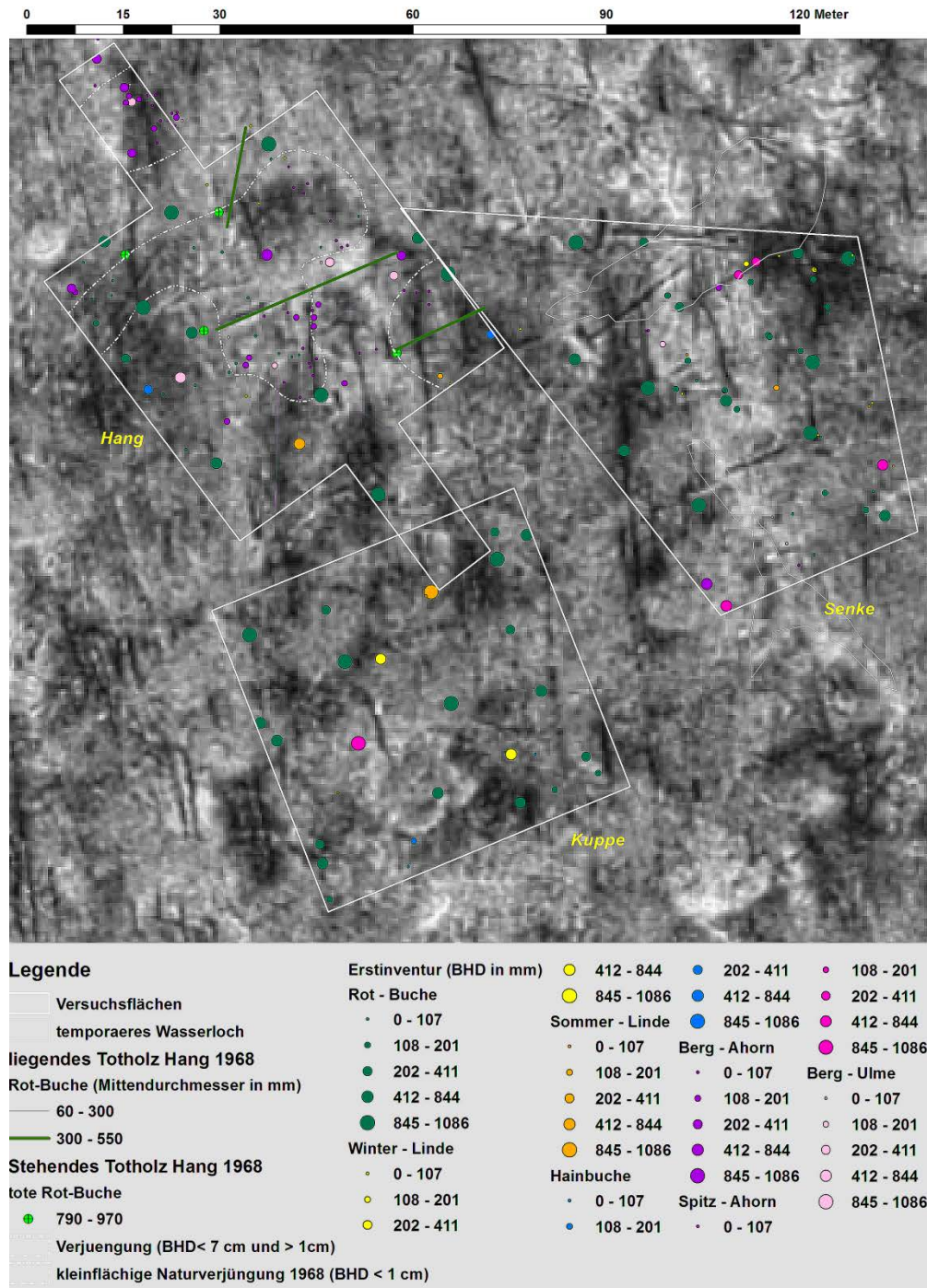


Abb. 4.2-20: Georeferenziertes und entzerrtes Luftbild vom 30.3.1978 (entlaubter Zustand, Pixelauflösung 0,40 m) mit eingezeichneten Grenzen der Untersuchungsflächen und den Stammfußkoordinaten, Verjüngungseinseln sowie liegendem Totholz der Erstinventuren (Luftbildquelle: Bild 44 des Films C 727909 - 78 Bundesarchiv Berlin)

Sowohl einzelne stehende tote Bäume als auch liegendes Totholz im Osten und Nordosten der *Kuppe*, im Südosten des *Hangs* sowie eine große Lücke im Osten der *Senke* fallen zunächst auf. Zudem signalisiert die hellrote Farbwiedergabe einzelner Kronen im Color-Infrarot-Luftbild den Verdacht eingeschränkter Baumvitalität.

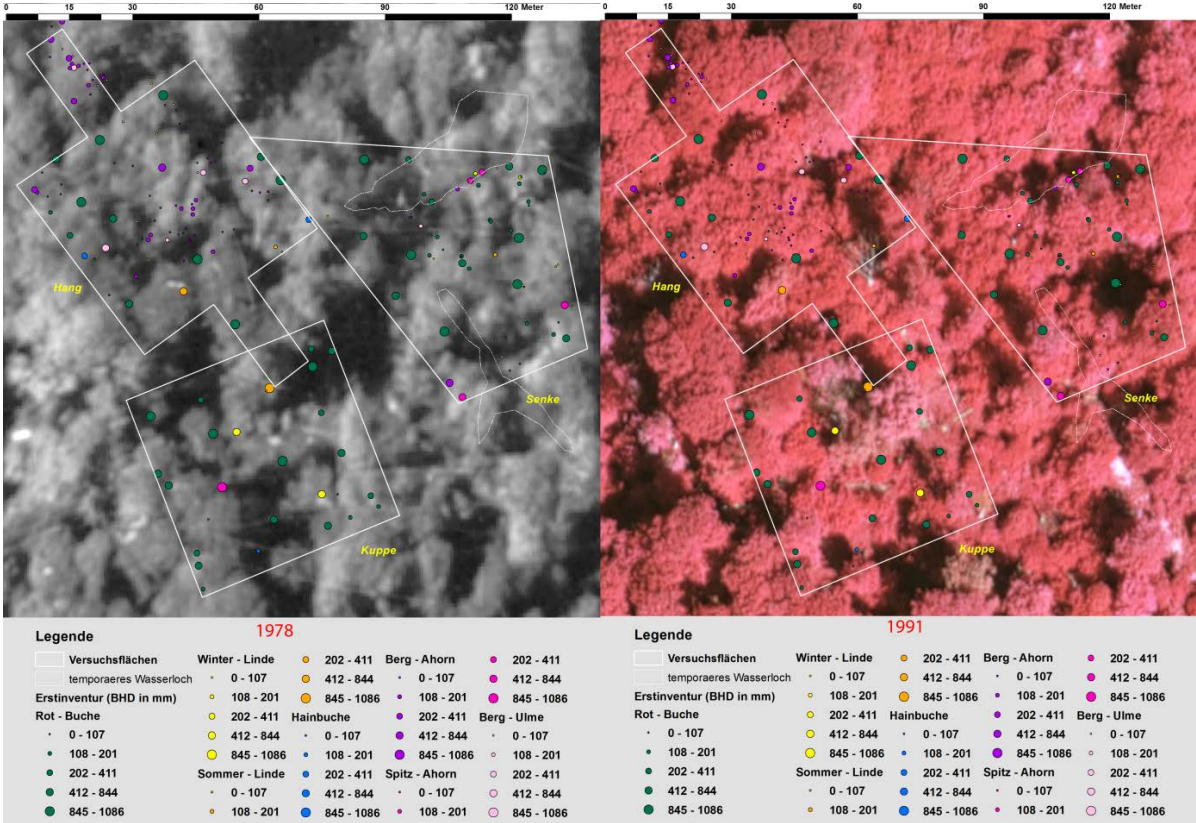


Abb. 4.2-21: Vergleichende Darstellung der eingescannten, georeferenzierten und entzerrten Luftbilder vom 23.5.1987 (links, Pixelauflösung 0,40 m) und 28.07.1991 (rechts, Pixelauflösung 0,21 m) mit eingezeichneten Grenzen der Untersuchungsflächen und den Stammfußkoordinaten sowie Verjüngungsinseln der Erstinventuren
(Luftbildquelle: Bild 42 des Film F 195 - 87 des Bundesarchiv Berlin und Bild 230 des CIR - Film F 164 - 91 von Geobasis Brandenburg)

Die Berechnung und Visualisierung des dreidimensionalen Vegetationshöhenmodells für den Waldzustand im Jahr 1991 eröffnet mit dem Höhenwert als dritter Dimension und dessen räumlichen Bezug und Ausdehnung (Flächengröße) die Möglichkeit, trotz nicht vorhandener terrestrischer Versuchsflächendaten in der vergleichenden Betrachtung mit dem 21 Jahre früheren (Abb. 4.2-18) und 21 Jahre späteren Vegetationshöhenmodell (Abb. 4.2-23) die zeitliche Abfolge der Bestandserneuerung in den drei Untersuchungsflächen räumlich zu rekonstruieren (Abb. 4.2-22):

1. Mit dem Focus auf den Oberstand (orange-rote Farbwahl mit Baumhöhen um die 35 m bis 40 m) erfolgte zwischen 1970 und 1991 der Zusammenbruch großer Teile des Altbestandes in allen drei Untersuchungsflächen.
2. In den 1990er Jahren war der Unter- bis Mittelhang der Fläche *Hang*, in der sich 1968 die von *Mansik* kartierten Verjüngungsgruppen des Berg-Ahorns befanden, mit Bestandeshöhen um die 20 m am weitesten vorangeschritten in der Entwicklung der neuen Waldgeneration.
3. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Hauptteil der *Senke* und des Mittelhangs der Fläche *Hang* mit Höhenwerten von 12 m bis 16 m im Stangenholzstadium. Auf der *Kuppe* und auf jenen Teilen des Südtails des *Hangs*, die in die *Kuppe* hineinragen, haben sich Dickungen (Bestandeshöhen um die 4 m bis 7 m) ausgebildet.

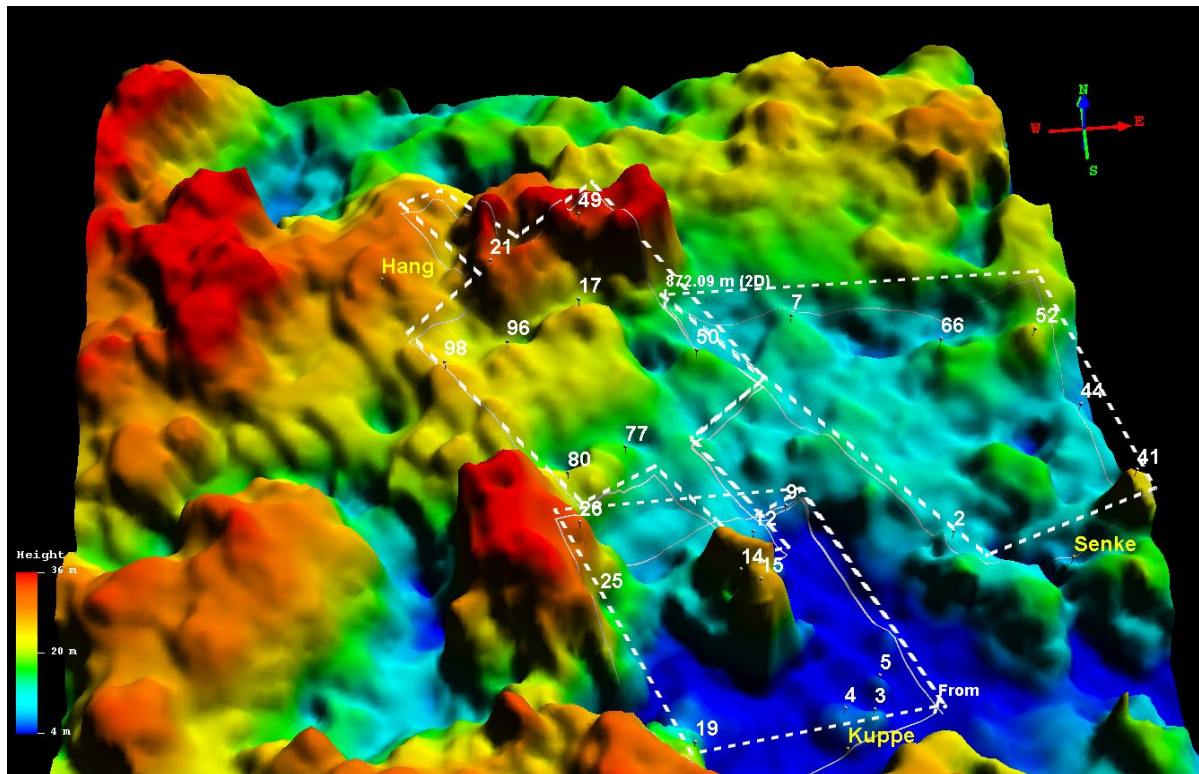


Abb. 4.2-22: Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell (Baumhöhe über Grund, Pixelauflösung 1,0 m) im Jahre 1991, dargestellt im dem Visualisierungsprogramm QT Reader mit den räumlichen Umrissen der drei Untersuchungsflächen und markanten Baumnummern, errechnet aus den Luftbildern 230 und 231 des Luftbildfilms F 164 - 910 vom 28.07.1991 (Luftbildquelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg). In Rottönen sind Baumhöhen um die 36 m wiedergegeben.

4. Zwischen 1991 und 2012 vollzog sich in der *Senke*, auf der *Kuppe* und dem *Hang* ein Sprung in die nächst höhere Wuchsklasse, d. h. das Dickungsstadium auf der *Kuppe* und dem Südteil des *Hangs* wuchs in das Stangenholzstadium und aus den Stangenholzbeständen in der *Senke* und dem Mittelhangbereich der Fläche *Hang* entwickelten sich junge Baumhölzer. Der Bestand auf dem Unterhang hatte dimensionsmäßig das mittlere Baumholzstadium erreicht.
5. Der Restvorrat an Überhältern der alten Baumgeneration verringerte sich kontinuierlich weiter, so fielen die Baumnummer 15 auf der *Kuppe*, die Nummer 49 am *Hang* und die Nummer 7 in der *Senke* aus.
6. Auffallend ist der ausgeprägte kleinflächige Charakter der Verjüngungskerne mit ihren flächenspezifischen Bestandeshöhen, die sich in der Raumeroberungsphase im Kampf um das Licht befinden (OTTO 2002, 651).
7. Aufgrund der in den letzten 21 Jahren gezeigten Wachstumsgeschwindigkeit der Verjüngungskerne in den drei Untersuchungsflächen ist prognostisch spätestens in etwa 20 Jahren zu erwarten, dass sich die Baumbestände in allen drei Flächen im Baumholzstadium befinden und sich eine Angleichung der Bestandeshöhen hin zu einem frühen Hallenwaldstadium auf ganzer Fläche vollzieht. Die wenigen noch vorhandenen Überhälter werden zusammengebrochen sein und deren Kronendachlücken durch den

vollzogenen Übergang der Baumbestände in die Raumfüllungsphase schnell geschlossen werden (OTTO 2002, 652).

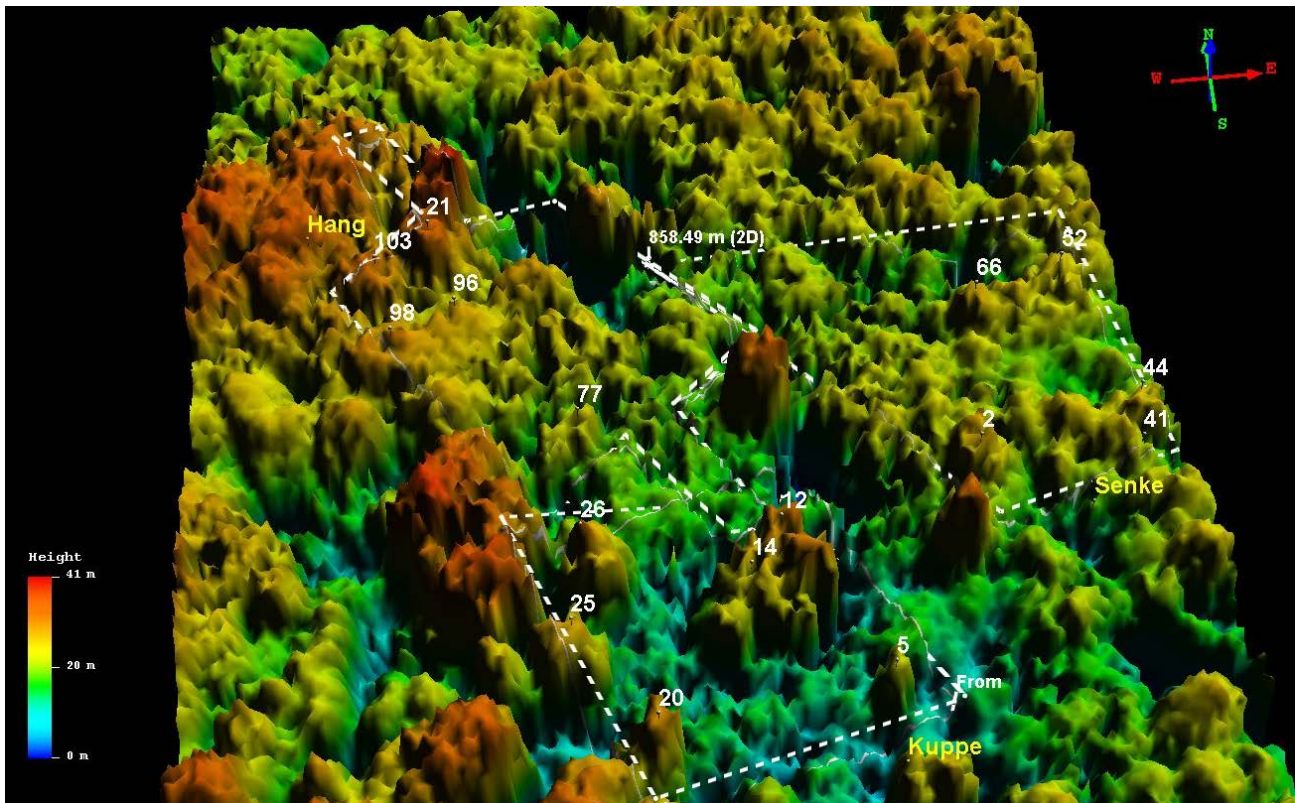


Abb. 4.2-23: Dreidimensionale Darstellung des Vegetationshöhenmodells 2012 (Pixelauflösung 1,0 m) der Untersuchungsflächen *Hang*, *Senke* und *Kuppe* mit Einzeichnung der Baumnummern markanter Einzelbäume, dargestellt mit dem Visualisierungsprogramm QT Reader (Datenquelle: Laserdaten Landesbetrieb Geobasis Brandenburg, 2012).

4.2.4 Validierung der Bestandesgeschichte durch dendrochronologische Untersuchungen an Buchenüberhältern

An den im Jahre 2012 im Rahmen der Wiederholungsinventur noch vorhandenen Buchenüberhältern wurde im Jahr 2013 jeweils ein Bohrspan zur Überprüfung der in den Forsteinrichtungswerken dokumentierten Bestandesgeschichte entnommen und am Jahrringmessplatz ausgelesen (Abb. 4.2-24). Die Auswertung der Bohrspäne ergab für vier von fünf Altbuchen (Buchen 21, 25, 26 und 41) ein gesichertes Alter von ca. 266 bis 283 Jahren (Aufwuchs ca. 1730 bis 1747¹⁰) und demzufolge mittleres Alter von 275 Jahren. Für die Buche Nummer 20 im Südwesten der *Kuppe* konnte anhand der Jahrringe die Baumgeschichte bis zum Jahre 1634 zurückverfolgt werden. Diese Buche gehört mit mindestens 379 Jahren der Elterngeneration der restlichen Buchenüberhälter an. Die Altersangabe der im Forstbetriebswerk von 1849 erwähnten älteren Buchen, „Alter bis zu 200 Jahre bei einem 50- bis 70-jährigen Buchenhauptbestand“, kann somit bestätigt werden (ABSCHÄTZUNGSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW-LÖCKNITZ 1849).

¹⁰ Die Bohrkern der Buchen auf der *Kuppe* (Nummer 20, 25 und 26) waren in den inneren 2,5 bis 4 cm faul, so dass die ersten Jahre nicht ausgewertet werden konnten. Die Bäume können demzufolge durchaus noch einige Jahre älter sein.

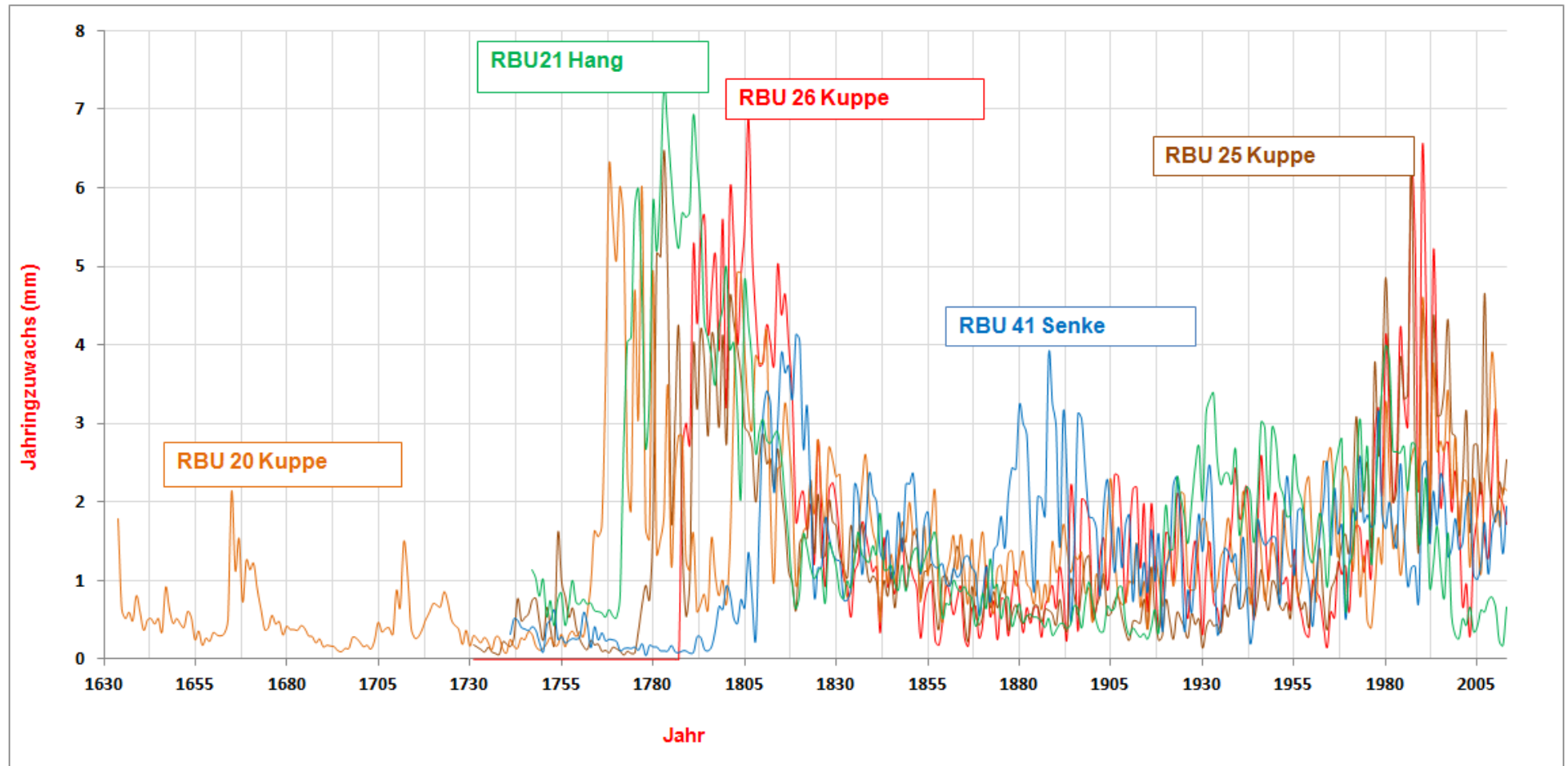


Abb. 4.2-24: Jahringzuwachsverlauf der fünf im Jahre 2012 noch in den Untersuchungsflächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* vorhandenen Buchenüberhälter

Die dem Betriebswerk aus dem Jahre 1922 entnommene Beschreibung von Buchen älter 180 Jahre dürfte auch korrekt sein, da das nachträglich anhand der dendrochronologischen Analysen ermittelte mittlere Bestandesalter im Jahre 1922 184 Jahre betrug (BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW 1922; Abb.4.2-24). Für den Bestand *Kuppe* spricht der äußerst geringe Jahrringzuwachs von 1 bis 2 mm/a der Buche Nummer 20 in den ersten 140 Jahren für eine äußerst extensive Nutzungsgeschichte. Stärkere Eingriffe in den Oberstand (entweder forstliche Nutzungen oder Sturmereignisse) scheinen auf der *Kuppe* erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts stattgefunden zu haben. In den Forstunterlagen ist hierzu nichts dokumentiert. Der Jahrringverlauf aller drei dort stockenden Buchen (Baumnummer 20, 25, 26) zeigt diesbezüglich starke übereinstimmende Verläufe. Der Radialzuwachs geht bei allen drei Bäumen danach kontinuierlich zurück, um zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch eine Trendwende wieder übereinstimmend anzusteigen. Am stärksten reagierte die Buche Nummer 21 auf dem *Hang* (Abb. 4.2-24). Die in der Folge des in den Forsteinrichtungsunterlagen erwähnten „Samenschlages“ erfolgten Auflichtungen bewirkten höchstwahrscheinlich diesen Zuwachs (BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW 1922). Der anhand des Vegetationshöhenmodells 1991 nachträglich rekonstruierte Bestandeszustand Anfang der 1990er Jahre (Dickungsphase mit wenigen Überhältern auf der *Kuppe*) wird durch den übereinstimmenden und sprunghaften Zuwachsverlauf der drei Alt-Buchen mit dem Maximum (bis zu 6,5 mm/a für Buche Nr. 26, 6,0 mm/a für Buche Nr. 25 und 4,5 mm/a für Buche Nr. 20) um das Jahr 1992 indizienhaft bestätigt. Bemerkenswert sind diese Zuwächse dieser zu diesem Zeitpunkt 250- bzw. 350-jährigen Buchen. Durch den wiederum übereinstimmend bei allen drei Buchen um das Jahr 1980 einsetzenden sprunghaften Jahrringzuwachsanstieg, der zugleich weit über den Jahrringzuwachs der beiden Buchen der *Senke* und des *Hangs* liegt, lässt sich der Beginn des flächigen Zusammenbruchs des Oberstandes auf der *Kuppe* um das Jahr 1980 datieren. Im Jahrringzuwachs der Buche 41 in der *Senke* ist der herausragende und plötzliche Zuwachs um das Jahr 1860 auffallend. Hierfür ist der zu diesem Zeitpunkt nur wenige Meter östlich vollzogene Kahlhieb zum Bau der Angermünde-Stralsunder Eisenbahn verantwortlich, der nach Osten und Süden starke Auflichtungen bewirkte. Aufgrund der äußerst geringen Probenanzahl je Untersuchungsfläche wird auf eine tiefergehende statistische Analyse der Zuwachsdaten verzichtet.

Kurze Zusammenfassung

- Zwischen 1960 und 1970 entstanden erste große Bestandeslücken auf dem *Hang*.
- Der Zusammenbruch des Oberstandes begann am Unter-*Hang* und griff von hier, begünstigt durch Windwurfschäden zweier Orkane in den 1970er Jahren, auch auf *Senke* und *Kuppe* über.
- Zwischen 1970 und 1991 löste sich der Altbestand in allen drei Flächen auf. Dies widerspiegelt sich im sprunghaft gestiegenen Radialzuwachs der überlebenden Alt-Buchen.
- Die Buchenbestände waren zu diesem Zeitpunkt zwischen 230 und 240 Jahre alt.
- Die im Jahre 1991 erkennbaren kleinflächigen Verjüngungskerne sind bis zum Jahre 2012 zu großflächigeren Einheiten zusammengewachsen und gleichen sich in der Bestandeshöhe langsam an.
- Die Altersangaben der archivarischen Unterlagen konnten mittels dendrochronologischer Untersuchungen bestätigt werden.
- Die älteste lebende Buche ist gegenwärtig ca. 400 Jahre alt.

4.2.5 Analysen der Stammzahldichten (Erst- und Wiederholungsinventur)

1. Vergleich der Stammzahldichten des Berg-Ahorns (1958/68 und 2012)

Mittels Analyse über Punktdichtekarten (SILVERMAN 1986), der Stammzahldichten der Hauptbaumarten in der Erst- und Wiederholungsinventur, sollen die Unterschiede zwischen der Verbreitung der jeweiligen Baumart im forstlich geprägten Ausgangsbestand und im durch Naturverjüngung entstandenen Folgebestand räumlich veranschaulicht werden. Beim Vorliegen unterschiedlicher Verbreitungsschwerpunkte einer Baumart zwischen Erst- und Wiederholungsinventur lassen sich mögliche standörtlichen Ursachen (Kalktiefe, Geländehöhenwert [Z], Exposition) durch die gemeinsame Darstellung in einem GIS-System grafisch sichtbar machen.

Beim Wechsel in den neuen Lebenszyklus des Buchenwaldes hatte der Berg-Ahorn eine Initialfunktion inne: Zum Zeitpunkt der Erstinventuren (1958/1968) war der Berg-Ahorn mit einem Baumholzexemplar der Stärkeklasse 5b sowie 54 Naturverjüngungsexemplaren (überwiegend der Durchmesserklasse 4 cm bis 8 cm) in der Fläche *Hang*, im Unterhang- und Mittelhangbereich, und ebenfalls mit einem Baumholzexemplar der Stärkeklasse 5b und 4 Naturverjüngungsexemplaren in der Untersuchungsfläche *Senke* vorhanden (Abb. 4.2-1 und Abb. 4.2-25, links). Auf der *Kuppe* fehlte er. Das vorhandene Lückenangebot auf dem *Hang* nutzend, verjüngte sich der Berg-Ahorn hangaufwärts und erreicht im Jahre 2012 im Oberhang der *Hang*-Fläche bzw. Nordhang der *Kuppe* sowie am Westhang der *Kuppe* die höchsten Stammzahlen (Abb. 4.2-25, rechts).

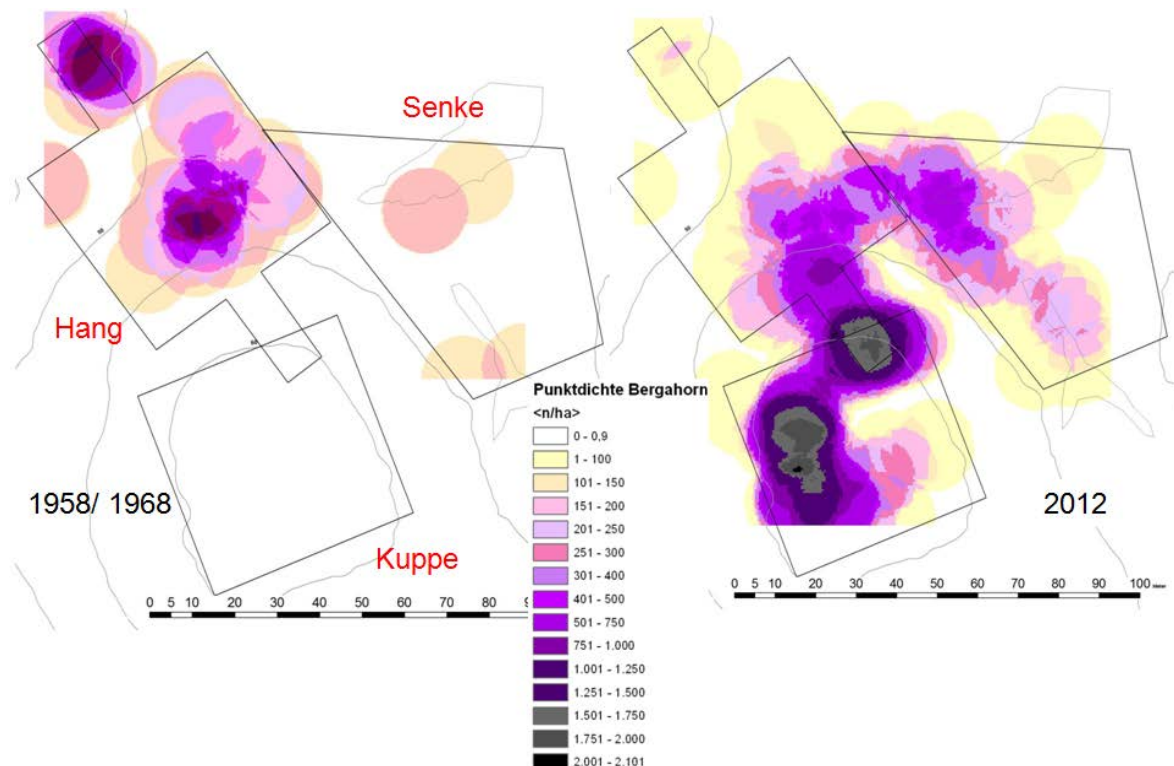


Abb. 4.2-25: Stammzahldichten der Baumart Berg-Ahorn, berechnet auf der Grundlage der Koordinaten der Stammlagepläne mit der Punktdichtefunktion des Spezialanalysewerkzeugs der Software Arc GIS mit dem Bezugsradius von 10 m, links für die drei Untersuchungsflächen der Erstinventur und rechts der Wiederholungsinventur im Jahre 2012

In beiden Flächen stellt er gegenwärtig ca. 50 % der Gesamtstammzahlen aller Baumarten. Der Grundflächenmittelstamm des Berg-Ahorns in der Fläche *Hang* beträgt mit 24,5 cm und 22 m Höhe Baumholzdimension, während er auf der Kuppenfläche mit 13,4 cm und 15,5 m Höhe erst die Stangenholzstärke erreicht hat (Tab. 4.2-5). Sowohl das expositionsbedingt zur Trockenheit neigende Zentrum der *Kuppe* als auch dessen Südteil wird vom Berg-Ahorn tendenziell gemieden. In der grundwasserbeeinflussten *Senke* besiedelte der Berg-Ahorn bis zur Wiederholungsinventur insbesondere die Standorte mit zeitlich erhöhtem (wechselfeuchtem) Grundwasserstand entlang der Nord-Süd-Verbindung zwischen den beiden temporären Wasserlöchern und erreicht einen Stammanteil von 25 % der Gesamtstammzahlen. Hier besitzt er gegenwärtig im Vergleich der drei Untersuchungsflächen den stärksten Grundflächenmittelstamm von 28,2 cm Durchmesser und 25 m Höhe (Tab. 4.2-5).

2. Vergleich der Stammzahldichten der Buche (1958/68 und 2012)

Die Stammzahldichten der Buche gingen in der vergleichenden Gegenüberstellung der Erstinventur (Abb. 4.2-26, links) und der Wiederholungsinventur (Abb. 4.2-26, rechts) um durchschnittlich eine Dichteklasse zurück. Die Buche zeigte 2012 im Gegensatz zur Erstinventur ein standorts- und versuchsflächenspezifisches Verjüngungsverhalten.

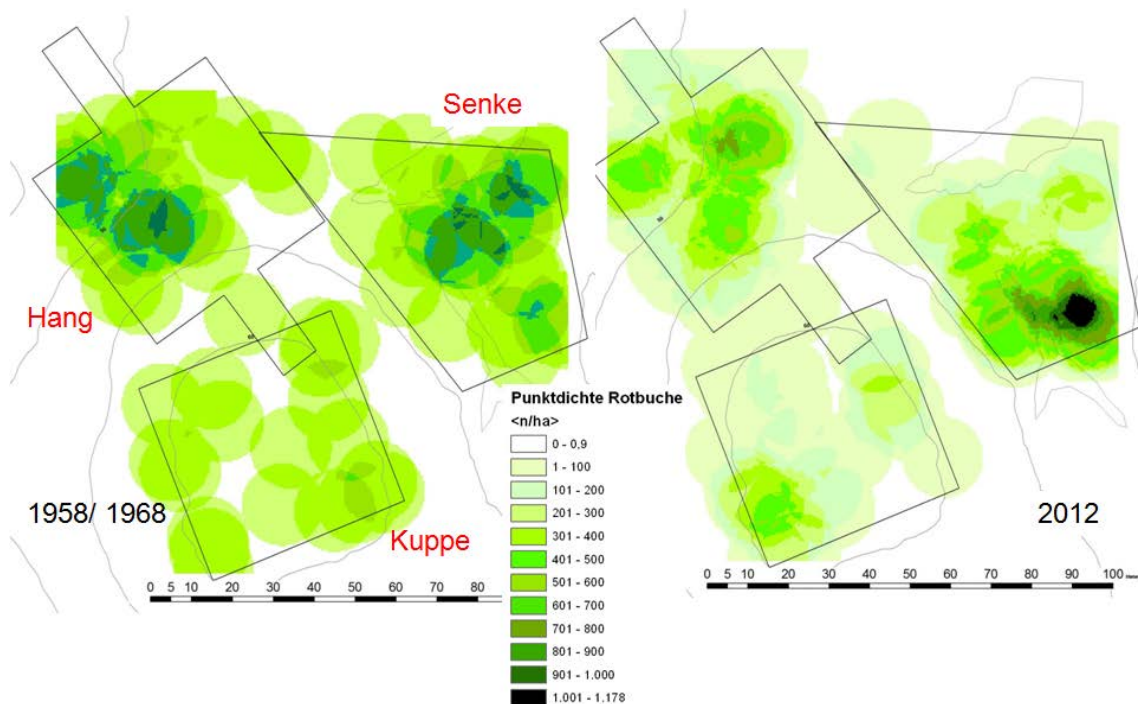


Abb. 4.2-26: Stammzahldichten der Baumart Buche, berechnet auf der Grundlage der Koordinaten der Stammlagepläne mit der Punktdichtefunktion des Spezialanalysewerkzeugs der Software Arc GIS mit dem Bezugsradius von 10 m, links für die drei Untersuchungsflächen der Erstinventur und rechts der Wiederholungsinventur im Jahre 2012

Während sie in der Erstinventur auf der *Kuppe* eine gleichmäßige Stammzahlverteilung aufwies, zeigte sie 2012 eine Tendenz zur bevorzugten Verjüngung an kühleren und luftfeuchteren West- und Nordostbereichen der *Kuppe*. Hier verjüngt sie sich insbesondere unter dem Schirm des vorwüchsigen Berg-Ahorns. Sie hat gegenwärtig mit einem

Durchmesser von 8 cm und 11 m Baumhöhe den vergleichsweise kleinsten Grundflächenmittelstamm unter den beobachteten Baumarten (Tab. 4.2-5). Ihr Anteil an der Gesamtstammzahl der *Kuppe* beträgt zurzeit nur noch 14 %. Auf der Fläche *Hang* gingen die anteiligen Stammzahlen der Buche, ähnlich wie auf der *Kuppe*, im Vergleich zur Erstinventur zurück (Abb. 4.2-26). Im Unterschied zur *Kuppe* blieb der Verbreitungsschwerpunkt der Buche im Mittel- und Unterhang der Fläche *Hang* durch die hier erfolgte Buchennaturverjüngung erhalten. Sie hat dort einen Stammzahlanteil von gegenwärtig 41 %. Ihr Grundflächenmittelstamm hat mit 22 cm Durchmesser und 22 m Höhe die Baumholzdimension erreicht (Tab. 4.2-5). Den höchsten Anteil an der Gesamtstammzahl einer Untersuchungsfläche im Jahre 2012 hat die Buche mit 44 % in der *Senke*. Sie verjüngte sich bevorzugt auf den leicht erhöhten Arealen im Süden und Südosten der wechselfeuchten *Senke* und hat gegenwärtig nach der Pionierbaumart Berg-Ahorn mit 23 cm Durchmesser den stärksten Grundflächenmittelstamm (Abb.4.2-8 und 4.2-26).

3. Vergleich der Stammzahldichten der Winter-Linde (1958/68 und 2012)

Die Baumart Winter-Linde¹¹, die in der Erstinventur mit wenigen Exemplaren in allen drei Untersuchungsflächen präsent war, hat im Jahre 2012 zwei Verbreitungsschwerpunkte (Abb. 4.2-27, links):

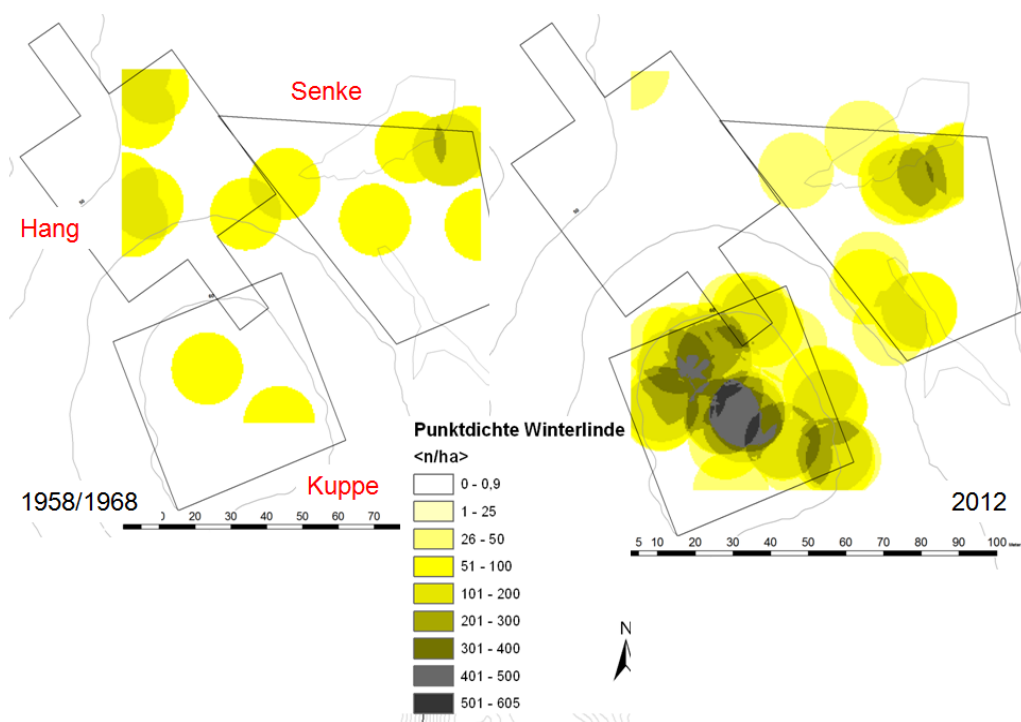


Abb. 4.2-27: Stammzahldichten der Baumart Winter-Linde, berechnet auf der Grundlage der Koordinaten der Stammlagepläne mit der Punktdichtefunktion des Spezialanalyse-Werkzeugs der Software Arc GIS mit dem Bezugsradius von 10 m, links für die drei Untersuchungsflächen der Erstinventur und rechts der Wiederholungsinventur im Jahre 2012

¹¹ Beide in den Untersuchungsflächen vorkommende Lindenarten wurden anhand der Merkmale – artspezifische Blattform, Blattunterseitenfärbung, der Blatt- und Triebbehaarung und der Form der Blattzählung – morphologisch angesprochen und die Artzugehörigkeit genetisch überprüft (Abschnitt 4.6.2).

Zum einen mit einem Anteil von 25 % an der Gesamtstammzahl auf der *Kuppe* und zum anderen mit etwa 9 % an der Gesamtstammzahl in den tieferen, wechselfeuchten Lagen in der *Senke* (Abb. 4.2-27, rechts). Auf der *Kuppe* verjüngte sie sich bevorzugt auf dem Flächenmittelpunkt sowie der Süd- und Südostseite in den expositionsbedingt zur Austrocknung neigenden Standortsbereichen, die zugleich hoch anstehenden Kalk aufweisen (Abb.4.1-1 und 4.2-27, rechts). Der Grundflächenmittelstamm der Winter-Linde auf der *Kuppe* (ohne Berücksichtigung des Restvorrats) hat gegenwärtig mit 14 cm den im Baumartenvergleich stärksten Durchmesser. In der *Senke* weist der Grundflächenmittelstamm mit 19 cm Durchmesser und 17 m Höhe einen zwar stärkeren, aber im Baumartenvergleich hinter dem Berg-Ahorn und der Buche deutlich zurückgebliebenen Wert auf (Tab. 4.2-5). Die Winter-Linde verjüngte sich hier offensichtlich unter dem vorwüchsigen Berg-Ahorn, mit dem sie sich die wechselfeuchten Standräume teilt (Abb. 4.2-25, rechts und 4.2-27, rechts). In der Fläche *Hang* kommt die Winter-Linde im Jahre 2012 nur mit einem Baumexemplar an der nördlichen Bestandesgrenze vor.

4. Vergleich der Stammzahldichten der Sommer-Linde (1958/68 und 2012)

Die wärmeliebende Sommer-Linde war mit einzelnen Exemplaren in allen drei Untersuchungsflächen zum Zeitpunkt der Erstinventur vorhanden (Abb. 4.2-28, links).

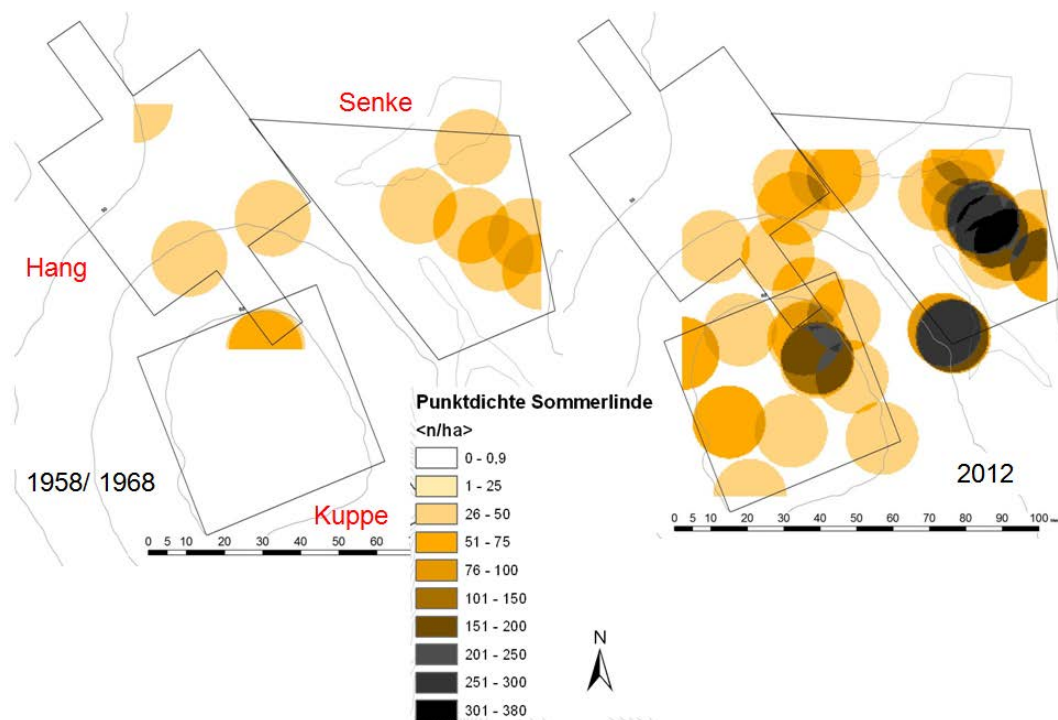


Abb. 4.2-28: Stammzahldichten der Baumart Sommer-Linde, berechnet auf der Grundlage der Koordinaten der Stammlagepläne mit der Punktdichtefunktion des Spezialanalyse-Werkzeugs der Software Arc GIS mit dem Bezugsradius von 10 m, links für die drei Untersuchungsflächen der Erstinventur und rechts der Wiederholungsinventur im Jahre 2012

Sie verjüngte sich erfolgreich bis zum Jahre 2012 auf zwei Untersuchungsflächen: Auf der *Kuppe* etablierte sie sich ausgehend vom Oberhang der *Hang*-Fläche bzw. vom Nordrand der *Kuppe* mit geringen Stammzahlen flächig nach Süden. Einen zweiten

Verjüngungsschwerpunkt bilden in Analogie zu den bevorzugten Verjüngungsräumen der Buche die etwas erhöhten Standorte im Osten, Süden und Südosten der *Senke*. Hier hat sie gegenwärtig einen Anteil von 14 % an den Gesamtstammzahlen der Fläche erreicht. Sie besitzt hier mit 19 cm Durchmesser einen im Vergleich zum Berg-Ahorn und zur Buche deutlich geringeren Grundflächenmittelstamm (Tab. 4.2-5). Nördlich (und damit hangabwärts) der bereits 1968 vorhandenen Verbreitungsgrenze im Oberhang des *Hanges* konnte sich die Sommer-Linde bis zur Wiederholungsinventur 2012 nicht erfolgreich verjüngen (Abb. 4.2-8 und 4.2-28).

Kurze Zusammenfassung

- Über Punktdichtekarten können Unterschiede in der räumlichen Verbreitung der jeweiligen Baumart im forstlich geprägten Ausgangsbestand und im durch Naturverjüngung entstandenen Folgebestand unter Nutzung von digitalen Standortdaten veranschaulicht werden. Für die Hauptbaumarten können folgende Aussagen getroffen werden:
- Die Baumart Berg-Ahorn hatte im Verjüngungsgeschehen eine Initialfunktion inne und verjüngte sich hangaufwärts. Im Jahr 2012 besitzt sie am Oberhang der *Hang*-Fläche, am Nordhang der *Kuppe* sowie am Westhang der *Kuppe* die höchsten Stammzahlen. In der grundwasserbeeinflussten *Senke* besiedelte sie bevorzugt die Standorte mit zeitlich erhöhtem (wechselfeuchtem) Grundwasserstand.
- Die Buche war in der Erstinventur flächig vorhanden. Bis zum Jahr 2012 gingen ihre Stammzahldichten um durchschnittlich eine Dichteklasse zurück. Ihr Verbreitungsschwerpunkt ist auf dem Mittel- und Unterhang der Fläche *Hang* geblieben. Auf der *Kuppe* werden im Jahre 2012 die kühleren und luftfeuchteren West- und Nordostbereiche bevorzugt und das Zentrum von ihr gemieden. In der *Senke* verjüngte sie sich auf den leicht erhöhten Arealen im Süden und Südosten.
- Die Winter-Linde war in der Erstinventur nur vereinzelt vorhanden. Im Jahre 2012 hat sie zwei Verbreitungsschwerpunkte: Auf der *Kuppe* verjüngte sie sich auf den höchsten Geländeerhebungen sowie der Süd- und Südostseite mit hoch anstehendem Kalk, während sie in der *Senke* zusammen mit dem Berg-Ahorn die wechselfeuchten Standräume besiedelte.
- Die Sommer-Linde war ebenfalls in der Erstinventur nur vereinzelt vorhanden. Sie verjüngte sich bis zum Jahre 2012 nur auf der *Kuppe* und in der *Senke*, der Mittel- bis Unter-*Hang* wurde gemieden. In der grundfeuchten *Senke* werden die leicht erhöhten Bestandespartien in Konkurrenz zur Buche bevorzugt, auf der *Kuppe* besiedelt sie sowohl das Zentrum als auch die südlichen Bereiche.

4.2. 6 Vegetationskundliche Untersuchungsergebnisse der Wiederholungsinventur

4.2.6.1 Flächige Vegetationskartierung mit Ausscheidung soziologischer Artengruppenkombinationen

Der im Rahmen der Wiederholungsinventur in der Interaktion von Standort (insbesondere der Kalktiefe und der Stammfeuchtestufe) und der Baumartenzusammensetzung der neuen Waldgeneration nach annähernd 55 Jahren ungestörter Waldentwicklung herausgebildete Vegetationszustand der drei Untersuchungsflächen ist der Abb. 4.2-29 zu entnehmen.



Abb. 4.2-29: Ergebniskarte der flächigen Vegetationskartierung vom Juni 2014 mit Darstellung der soziologischen Artengruppenkombination, Erläuterung zu den gewählten Farben der Baumarten des lebenden Bestandes siehe Abb. 4.2-7

Zur Charakterisierung der aktuellen Vegetation wurden Kombinationen der soziologischen Artengruppen flächenübergreifend gebildet, um Vegetationsunterschiede sichtbar zu machen und analytisch Rückschlüsse auf den Oberbodenzustand ziehen zu können (HOFMANN & POMMER 2013, 32 ff.). In den Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Hang* dominiert im Sommer mit Deckungsgraden von 50 % bis 80 % das Bingelkraut (*Mercurialis perennis*), Namensgeber der gleichnamigen *Mercurialis perennis* Artengruppe (Abb. 4.2-29). Arten der *Lamium galeobdolon* Gruppe sind in unterschiedlichen Deckungsgraden vertreten. Der Flächenanteil der *Mercurialis perennis* - *Lamium galeobdolon* Artengruppenkombination nimmt etwa 70 % der Waldbodenfläche ein.



Abb. 4.2-30: Dichte Bodenbedeckung mit *Mercurialis perennis* (Bingelkraut) im Zentrum der *Kuppe*, im Hintergrund Winter-Linde (Mitte) und der Sommer-Linde (halb rechts) im Juli 2016

Unter dem Einfluss von erhöhter Grundfeuchte tritt in der *Senke* das Bingelkraut zurück. Dies stellte Mansik bereits im Jahre 1968 fest (MANSIK 1971, 37 f.). Es ist hier nur auf den leicht erhöhten Bestandespartien am West- und Ostrand der Fläche mit ca. 17 % Flächenanteil etabliert (Abb. 4.2-29 und Abb. 3.2-1). Vorherrschend in der Fläche *Senke* sind mit knapp 48 % Flächenanteil Pflanzenarten der *Aegopodium podagraria* Gruppe und der *Lamium galeobdolon* Gruppe.



Abb. 4.2-31: *Aegopodium podagraria* in der *Senke* (Sommeraspekt) im Juli 2016

Kennzeichnend hierfür ist das gemeinsame Auftreten von *Aegopodium podagraria*, *Lamium galeobdolon* und *Pulmonaria obscura* (Abb. 4.2-31). Die *Aegopodium podagraria* und *Lamium galeobdolon* Artengruppenkombination ist in den Untersuchungsflächen *Hang* mit 23 % und *Kuppe* mit 26 % anteilig verbreitet. Schließlich nimmt die soziologische Artengruppenkombination der *Melica uniflora* Gruppe und *Lamium galeobdolon* Gruppe, die sich durch das gemeinsame Auftreten von *Melica uniflora*, *Lamium galeobdolon*, *Galium odoratum* und *Anemone nemoralis* (im Frühjahrsaspekt) auszeichnet, mit abnehmenden Flächenanteilen von 22 % in der *Senke*, 9 % im *Hang* und 3 % in der *Kuppe*, den kleinsten Flächenanteil ein (Abb. 4.2-29 und 4.2-32).



Abb. 4.2-32: *Melica uniflora* und *Galium odoratum* mit Naturverjüngung Buche im Südwesten der Fläche *Hang* (Juli 2016)

Die Analyse der dekadischen Weiserwerte der Oberbodenfeuchte (DK_F) und Oberbodentrophie ($DK_{C/N}$ und $DK_{V\%}$) der in den Jahren 2008, 2014 und im Frühjahr 2016 durchgeführten Vegetationsaufnahmen ergab in den Oberbodentrophiewerten deutliche und in den dekadischen DK_F -Werten leichte Unterschiede zwischen den drei soziologischen Artengruppenkombinationen (Abb. 4.2-33 und Tab. 4.2-8). Die *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination ist mit dem Medianwert der dekadischen Trophiewerte ($DK_{C/N}$) von 8,0 als stickstoffreich bis kräftig, mit dem Medianwert der dekadischen Trophiewerte ($DK_{V\%}$) von 6,6 als basenreich bis basenkräftig einzustufen und erreicht im Vergleich die höchsten Trophiewerte. Auffallend ist der schmale Wertebereich, erkennbar an den engen Quantilgrenzen der beiden dekadischen Trophiewerte. Der DK_F -Wert der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination ist hingegen mit einem Medianwert von 5,7 als mäßig feucht bis mäßig trocken und im Vergleich als unterdurchschnittlich einzuschätzen. Der Median der beiden dekadischen Trophiewerte der *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination ist mit $DK_{C/N}$ von 7,9 als stickstoffreich bis -kräftig und $DK_{V\%}$ von 6,3 als basenkräftig einzustufen. Die Werte zeigen im Vergleich zur *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination einen geringfügig stickstoff- und basenärmeren Oberbodenzustand an. Der Median des DK_F -Wertes ist mit 6,0 als feucht bis mäßig frisch zu bewerten und zeigt einen frischen Oberbodenzustand an.

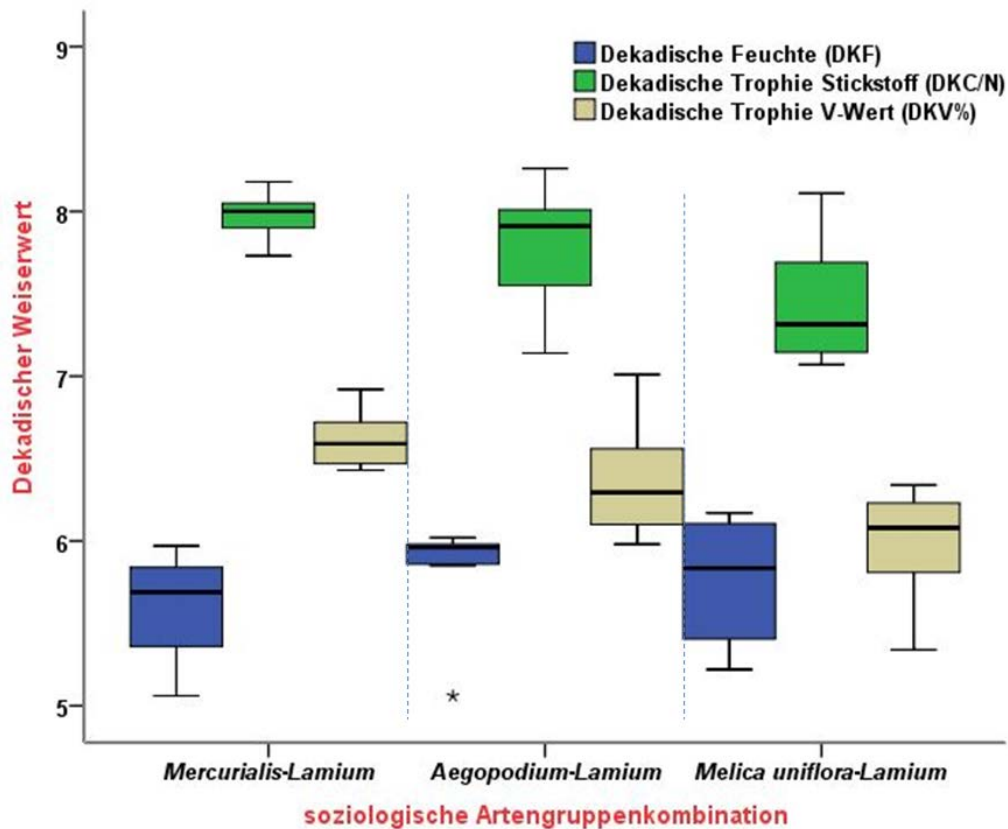


Abb. 4.2-33: Boxplots der DK_F -, $DK_{C/N}$ - und $DK_{V\%}$ -Werte der drei soziologischen Artengruppenkombinationen

Der Wertebereich der DK_F -Werte ist sehr eng (Abb. 4.2-33). Die Artengruppenkombination der *Melica uniflora*- und der *Lamium*-Gruppe hat mit Medianwerten $DK_{C/N}$ von 7,3 stickstoffkräftige und $DK_{V\%}$ von 6,1 basenkräftige Oberbodenwerte. Der Oberbodenfeuchtezustand ist mit einem Medianwert von 5,85 etwas frischer einzuschätzen als der der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination. Die beschriebenen Unterschiede im Oberbodenzustand sind auch an den Mittelwerten der dekadischen Weiserwerte DK_F und $DK_{C/N}$ sowie $DK_{V\%}$ erkennbar (Tab. 4.2-8).

Tab. 4.2-8: Mittelwerte der Dekadischen Kennziffern DK_F , $DK_{C/N}$ sowie $DK_{V\%}$ der kartierten soziologischen Artengruppenkombinationen

Soziologische Artengruppenkombination	DK_F	$DK_{C/N}$	$DK_{V\%}$	Anzahl der Aufnahmen
<i>Mercurialis-Lamium</i> Gruppe	5,6	8,0	6,6	9
<i>Aegopodium-Lamium</i> Gruppe	5,9	7,8	6,3	14
<i>Melica uniflora-Lamium</i> Gruppe	5,8	7,8	6,0	8

Gesicherte Unterschiede zwischen den dekadischen Mittelwerten der soziologischen Artengruppenkombinationen bestehen jedoch nur in den dekadischen Trophiewerten $DK_{C/N}$ und $DK_{V\%}$ (Tab. 4.2-9). Die Mittelwerte der dekadischen Feuchtwerte unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Tab. 4.2-9: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der dekadischen Weiserwerte der Oberbodenvegetation ,klassifiziert nach soziologischen Artengruppenkombinationen, gesicherte Unterschiede fett hervorgehoben

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
DK_F	zwischen den Gruppen	0,333	2	0,167	1,756	0,191
DK_{C/N}	zwischen den Gruppen	1,336	2	0,668	6,759	0,004
DK_{V%}	zwischen den Gruppen	1,454	2	0,727	7,992	0,002

Die Homogenität der Varianzen ist gegeben, da $\alpha > 0,05$ (Tab. 4.2-10).

Tab. 4.2.-10: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene Statistik	df1	df2	Signifikanz
DK_F	3,120	2	28	0,06
DK_{C/N}	2,899	2	28	0,072
DK_{V%}	0,298	2	28	0,745

Ein zusätzlicher paarweiser Vergleichstest (multiple Varianzanalyse nach der Scheffé-Prozedur) bestätigte die signifikanten Unterschiede der Mittelwerte der dekadischen DK Trophiewerte zwischen den soziologischen Artengruppenkombinationen (Tab. 4.2-11).

- Die Mittelwerte des **DK_{C/N}** unterscheiden sich (beidseitig),
 - signifikant zwischen der *Mercurialis-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium*,
 - zwischen der *Aegopodium - Lamium* und der *Melica uniflora - Lamium* Artengruppenkombination, das Signifikanzniveau wurde aber mit [P = 0,06] knapp verfehlt.
- Die Mittelwerte des **DK_{V%}** unterscheiden sich (beidseitig),
 - signifikant zwischen der *Mercurialis-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium*,
 - zwischen der *Aegopodium-Lamium* und der *Melica uniflora - Lamium* Artengruppenkombination, das Signifikanzniveau wurde aber mit [P = 0,06] nicht erreicht.

Tab. 4.2-11: Multipler Mittelwertvergleich durch paarweise Signifikanzprüfung der Mittelwerte der dekadischen Weiserwerte zwischen den soziologischen Artengruppenkombinationen nach der Scheffé-Prozedur (gesicherte Unterschiede sind fett hervorgehoben)

Abhängige Variable	Soziologische Artengruppenkombination	Soziologische Artengruppenkombination	P-Wert
DK_{C/N}	<i>Mercurialis-Lamium</i>	<i>Aegopodium-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,312 0,004
	<i>Aegopodium-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,312 0,060
	<i>Melica uniflora-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Aegopodium-Lamium</i>	0,004 0,060
DK_{V%}	<i>Mercurialis-Lamium</i>	<i>Aegopodium-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,182 0,002
	<i>Aegopodium-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,182 0,055
	<i>Melica uniflora-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Aegopodium-Lamium</i>	0,002 0,055

Keine signifikanten Unterschiede gibt es zwischen den Mittelwerten der dekadischen Trophiewerte der *Mercurialis-Lamium* und der *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination. Da für die signifikanten Unterschiede in den dekadischen Trophiewerten zwischen den drei soziologischen Artengruppenkombinationen nach annähernd 50 Jahren ungestörter Waldentwicklung Unterschiede in den Stammeigenschaften der Böden in Frage kamen, wurde der Zusammenhang soziologische Artengruppenkombination und Kalktiefe untersucht (Abb. 4.1-1). Hierzu erfolgte eine Verschneidung der Rasterpunkte (Abb. 3.2-3) mit den Artengruppenkombinationen (Abb. 4.2-29) und den Kalktiefen (Abb. 4.1-1). Die Medianwerte der artengruppenspezifischen Kalktiefen sind in Abb. 4.2-34 dargestellt.

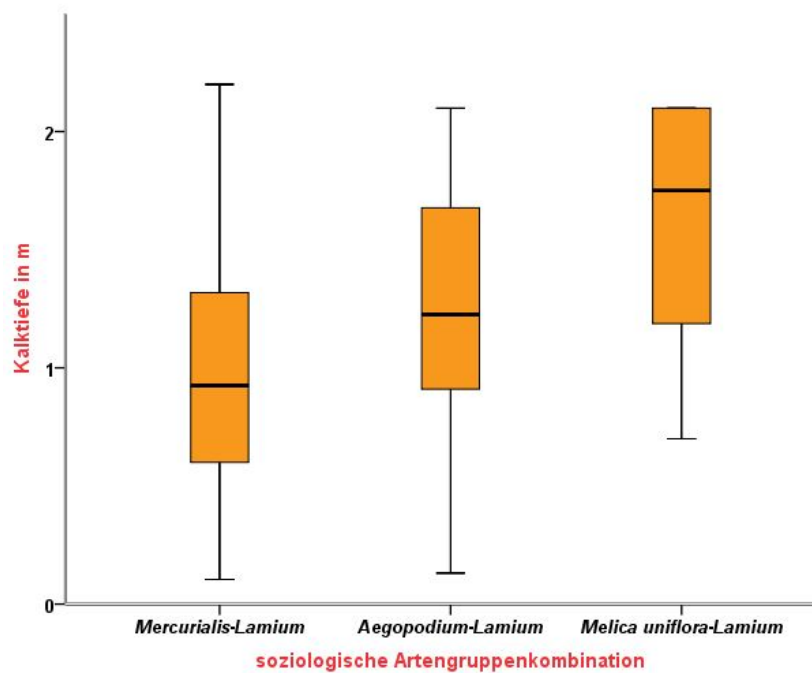


Abb. 4.2-34: Boxplots der ermittelten Kalktiefen der drei soziologischen Artengruppenkombinationen

Es zeigt sich eine artengruppenspezifische Gliederung der Kalktiefen. Der Medianwert der Kalktiefe der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination beträgt 0,93 m, der der *Aegopodium-Lamium* 1,25 m und der der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination liegt bei 1,75. Das Auftreten der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination in den Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* signalisiert oberflächennah anstehenden Kalk. Die Unterschiede in den Medianwerten der Kalktiefen der durch Artengruppenkombinationen ausgeschiedenen Vegetationseinheiten sind signifikant. Der Varianztest der Mittelwerte der Kalktiefen bestätigte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,001$ die Unterschiede (Tab. 4.2-12). Es bestehen weite Überlappungsbereiche der Kalktiefen zwischen den Standorten der *Mercurialis-Lamium* und *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination.

Tab. 4.2-12: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der Kalktiefen der soziologischen Artengruppenkombinationen

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
Kalktiefe in m	zwischen den Gruppen	4,115	2	2,057	8,157	0,001

Die Homogenität der Varianzen ist gewährleistet, da $P > 0,05$ (Tab. 4.2-13).

Tab. 4.2-13: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene Statistik	df1	df2	Signifikanz
Kalktiefe	0,200	2	89	0,819

Durch den multiplen Mittelwertvergleich konnten Unterschiede in den Kalktiefen zwischen der *Mercurialis-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination als gesichert festgestellt werden. Zwischen der *Mercurialis-Lamium* und der *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination sind Unterschiede in den Kalktiefen für ca. 90 % des Stichprobenumfangs gesichert (Tab. 4.2-14).

Tab. 4.2-14: Multipler Mittelwertvergleich durch paarweise Signifikanzprüfung der Mittelwerte der Kalktiefen zwischen den soziologischen Artengruppenkombinationen nach der Scheffé-Prozedur (gesicherte Unterschiede fett hervorgehoben)

Abhängige Variable	Soziologische Artengruppenkombination	Soziologische Artengruppenkombination	Signifikanz
Kalktiefen	<i>Mercurialis-Lamium</i>	<i>Aegopodium-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,052 0,002
	<i>Aegopodium-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Melica uniflora-Lamium</i>	0,052 0,212
	<i>Melica uniflora-Lamium</i>	<i>Mercurialis-Lamium</i> <i>Aegopodium-Lamium</i>	0,002 0,212

4.2.6.2 Ergebnisse der Vegetationsanalyse der Parzellen *Kuppe*, *Hang* und *Senke*

Da sich die neue Baumartenzusammensetzung in den Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* trotz der in allen drei Untersuchungsflächen als Kalkzeiger herausgearbeiteten gemeinsam vorkommenden Arten der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination markant voneinander unterscheidet, wurde in einem zweiten Untersuchungsansatz eine Feinkartierung der Vegetationsparzellen 48 (*Senke*), 51 und 55 (*Hang*) und 52 (*Kuppe*) durchgeführt, um standörtliche Ursachen hierfür festzustellen (Abb. 4.2-8 und 4.2-29). Der Tab. 4.2-15 sind Oberbodenzustände der einzelnen Parzellen zu entnehmen. Die Berechnung der dekadischen Werte erfolgte über die Berücksichtigung des prozentualen Deckungsgrades der jeweiligen Artengruppe im Verhältnis zum Gesamtdeckungsgrad aller Arten (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.).

Tab. 4.2-15: Darstellung der dekadischen Oberbodenzustandswerte (ohne Baumschicht)

Fläche	<i>Senke</i>	(Unter- bis Mittel)- <i>Hang</i>	(Ober) <i>Hang</i>	<i>Kuppe</i>
Lage über NHN [m]	52 bis 53	49 bis 52	55 bis 60	61 bis 62,5
DK _F	6,0	5,9	5,8	5,6
DK _{C/N}	7,9	7,8	7,5	8,0
DK _{V%}	6,3	6,5	6,2	6,6
festgestellte Artenanzahl (ohne Mooschicht)	42	31	30	40

Der anhand der Vegetation analysierte Oberbodentrophiezustand in den vier Parzellen befindet sich insgesamt auf ähnlichem Niveau. Hinsichtlich der Stickstoffausstattung sind die Parzellen 52 (*Kuppe*), 48 (*Senke*) und 55 (Unter- bis Mittel-*Hang*) als stickstoffreich bis stickstoffkräftig einzuschätzen. Die ermittelte Stickstoffausstattung des Oberbodens der Parzelle 51 (Ober-*Hang*) ist als stickstoffkräftig und damit etwas schwächer zu charakterisieren. In der durch die Vegetation wiedergegebenen Basenausstattung tendiert der Oberbodenzustand in den von *Mercurialis perennis* in der Krautschicht dominierten Parzellen 52 (*Kuppe*) und 55 (Unter- bis Mittel-*Hang*) zu basenreich bis basenkräftig, während er in den Parzellen 48 (*Senke*, Massenenfaltung von *Aegopodium podagraria*) und 51 (Ober-*Hang*, Dominanz von *Melica uniflora* und *Galium odoratum*) eher zu basenkräftig neigt. Insofern bestätigen diese dekadischen Oberbodenzustandstrophiewerte die Ergebnisse der flächigen Vegetationskartierung (Abb. 4.2-29). Der anhand der Strauch-, Kraut- und Moosschicht der Vegetation analysierte Oberbodenfeuchtezustand in den vier Parzellen zeigt eine enge Bindung an den Geländehöhenwert [Z (m)]. Von einem feuchten bis mäßig frischen Zustand in den am tiefsten liegenden Parzellen der *Senke* und dem unteren bis mittleren Teil der Fläche *Hang* nimmt er hangaufwärts leicht ab. Auf der *Kuppe* ist anhand der Vegetationsanalyse ein mäßig feuchter bis mäßig trockener Oberbodenzustand vorhanden.

4.2.6.3 Ergebnisse des Methodenvergleichs zur indirekten Ermittlung der in den Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* vorhandenen kleinklimatischen Temperatur- und Feuchteunterschiede

Der in der Tab. 4.2-15 durch die Auswertung der Vegetationsanalyse der Arten der Strauch-, Kraut- und Moosschicht wiedergegebene flächenspezifisch differenzierte dekadische Feuchtwert indiziert unterschiedliche mikroklimatische Zustände, die als eine Ursache für die in den Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* in der neuen Baumgeneration vorhandene unterschiedliche Baumartenzusammensetzung angesehen werden können. Da direkte kleinklimatische Untersuchungen zur Feststellung von Unterschieden (Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchte) zwischen den drei Untersuchungsflächen nicht möglich waren, wird nachfolgend der Versuch unternommen, diese indirekt aus einer vertieften Vegetationsanalyse unter Anwendung von drei verschiedenen Methoden zu ergründen. Diese sind:

- Der spezielle vegetationskundlich-ökologische Zeigerwert für *sommerwarm* (dekadischer Feuchtwert 4) und *kühl* (dekadischer Feuchtwert 7 und 8) der soziologischen Artengruppen (HOFMANN & POMMER 2013, 32 ff.; Tab. 3.2-4), die Ermittlung der entsprechenden Differentialarten unter zusätzlicher Einbeziehung der Baumschicht sowie die Neuberechnung des dekadischen Feuchtwertes.
- Die für alle Arten der Vegetation praktizierte Zuordnung der ökologischen Zeigerwerte für Temperatur und Feuchte, die Herausarbeitung der Differentialarten für *Wärme* bzw. *Kühle* und die nachfolgenden flächenspezifischen Zeigerwertberechnungen (ELLENBERG 2000).
- Die Zuweisung der für die Baumarten veröffentlichten Angaben zur Klimalage und Klimaareal zu den Vegetationsaufnahmen, die Ergründung der Baumarten für *Sommerwärme* und *Kühle*, die Zuweisung ihrer Klimaareale sowie die abschließende flächenspezifische Klimalage – und Klimaareal-Analyse (OBERDORFER 1990).

Tab. 4.2-16 zeigt in der Gegenüberstellung die anhand der drei Methoden ermittelten Differentialarten für Wärme bzw. Mäßig-Wärme bis Wärmezeiger. Zusätzlich werden die Baumarten eine Klimaarealtypencharakterisierung unterzogen (OBERDORFER 1990).

Tab. 4.2-16: Gegenüberstellung der Differentialarten für Wärme (Arten mit Dekadischen Feuchtwert 4 (HOFMANN & POMMER 2013) sowie Arten mit den Zeigerwerten für Mäßig Wärme bis Wärmezeiger (T = 6) mit dem artspezifischen Feuchtwert nach ELLENBERG (2000), ergänzt durch die Einstufung der Arealtypenanalyse nach OBERDORFER (1990)

Wärmezeiger DK _F Wert 4	Ellenberg'sche Zeigerwerte		Arealtypenanalyse nach Oberdorfer (nur Baumarten)	
	Mäßig-Wärme bis Wärmezeiger (T = 6)	dazuge- höriger Feuchtwert	Klimalage	Klimaareal
Artenliste der Baumarten der Baum- und Strauchschicht, inklusive Keimlinge				
<i>Acer campestre</i>	<i>Acer campestre</i>	5	leichte Sommer- wärme	submediterrän- subatlantisch
<i>Acer platanoides</i>	<i>Acer platanoides</i>	–	sommerwarm	gemäßigt kontinental
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Carpinus betulus</i>	–	sommerwarm	gemäßigt kontinental- submediterrän
<i>Quercus petraea</i>	<i>Quercus petraea</i>	5	wintermild	subatlantisch- submediterrän
<i>Tilia platyphyllos</i>	<i>Tilia platyphyllos</i>	6	wintermild humid	subatlantisch bis submediterrän
<i>Tilia cordata</i>	(5)	5	sommerwarm	gemäßigt kontinental
Sonstige Arten der Strauchschicht				
<i>Euonymus europaea</i>	(5)	5		
Arten der Krautschicht & Moosschicht				
<i>Alliaria petiolata</i>	<i>Alliaria petiolata</i>	5		
–	<i>Anemone ranunculoides</i>	6		
<i>Brachypodium sylvaticum</i>	(5)			
<i>Elymus caninus</i>	<i>Elymus caninus</i>	6		
–	<i>Galium aparine</i>	–		
<i>Hepatica nobilis</i>	<i>Hepatica nobilis</i>	4		
<i>Lathyrus vernus</i>	<i>Lathyrus vernus</i>	5		
<i>Poa nemoralis</i>	–	5		
–	<i>Stellaria holostea</i>	5		
<i>Veronica hederifolia</i>	<i>Veronica hederifolia</i>	5		
14 Arten	13 Arten			

Ökologischer Feuchtwert: 7: Feuchtezeiger, 6: Frische- bis Feuchtezeiger, 5: Frischezeiger, 4: Trocken- bis Frischezeiger; Ökologischer Wärmezeiger: 6: Mäßig-Wärme bis Wärmezeiger, 5: Mäßig Wärmezeiger (beide: ELLENBERG 2000)

In der Bewertung der Klimaeigenschaften der einzelnen Pflanzenarten gibt es naturgemäß zwischen den drei Verfahren Unterschiede. Diese sind darin begründet, dass der für die Beurteilung der klimatischen Eigenschaften einer Pflanze wichtige Raum ihrer Massenentfaltung nur eine relative Standortskonstanz darstellt, d. h., dass dieser Raum nur für die genau untersuchte Standortsregion gilt und in einer anderen Region andere (klimatische) Verbreitungsschwerpunkte annehmen kann (OBERDORFER 1990). Die drei Verfahren wurden in unterschiedlichen Standortsregionen entwickelt, *Oberdorfers* Arealtypenanalyse für Südwestdeutschland, *Ellenbergs* Ökologische Zeigerwerte in den 1970er Jahren mit Schwerpunkt auf das westdeutsche Tief- und Hügelland und das *Hofmannsche* System der soziologischen Artengruppen im Nordostdeutschen Tiefland. Zudem bleibt festzuhalten, dass die Einstufung der ökologischen Eigenschaften der Pflanzenarten von *Ellenberg* nicht äquidistant, wie durch HOFMANN & POMMER (2013, 32 ff.), sondern empirisch erfolgte.

Tab. 4.2-17: Gegenüberstellung der Differentialarten für Kühle der kartierten Vegetation: Arten mit dem Dekadischen Feuchtwert 7 oder 8 (HOFMANN & POMMER 2013) sowie Arten mit den entsprechenden Zeigerwerten für Mäßig Wärme (T = 5), Mäßig Wärme bis Kühle (T = 4) und Kühle (T = 3) mit dem artspezifischen Feuchtwert (ELLENBERG 2000) und ergänzt durch die Einstufung der Arealtypenanalyse (OBERDORFER 1990)

Kühlezeiger DK _F Wert 7 bzw. 8	Ellenberg'sche Zeigerwerte		Arealtypenanalyse nach Oberdorfer (nur Baumarten)	
	Mäßig wärme-(T=5) Mäßig wärme bis Kühlezeiger (T=4), Kühlezeiger (T=3)	dazuge- höriger Feuchte- wert	Klimalage	Klimaareal
Artenliste der Baumarten der Baum- und Strauchschicht, inklusive Keimlinge				
<i>Acer pseudoplatanus</i>	(keine Angabe) <i>Acer pseudoplatanus</i>	6	Kühl-luftfeucht	Subatlantisch- submediterran
<i>Fagus sylvatica</i>	(5) <i>Fagus sylvatica</i>	5	Kühl-humid	
<i>Ulmus glabra</i>	(5) <i>Ulmus glabra</i>	6	Kühl-humid	
Artenliste der Krautschicht und Mooschicht				
–	(4) <i>Corydalis intermedia</i>	5		
<i>Dentaria bulbifera</i>	(5) <i>Dentaria bulbifera</i>	5		
<i>Mnium hornum</i>	(3) <i>Mnium hornum</i>	6		
<i>Veronica montana</i>	(5) <i>Veronica montana</i>	7		
6 Arten	7 Arten			

Trotzdem ist eine sehr große Ähnlichkeit in der Bewertung der Wärme- und Kühlezeiger unter den Arten, insbesondere den Baumarten, festzustellen. Hinsichtlich der Wärmezeiger unter den Baumarten gibt es zwischen den drei Methoden unterschiedliche Bewertungen für die Winter-Linde, die von *Ellenberg* nur als *Mäßig Wärmezeiger* eingestuft, und bei der Sommer-Linde und der Trauben-Eiche, deren Klimalage von *Oberdorfer* nur als *wintermild*

und vom Klimaareal als *subatlantisch* bis *submediterran* eingeschätzt wird (Tab. 4.2-16). Bei den Pflanzenarten der Strauch-, Kraut- und Moosschicht gehen die Klassifizierungen trotz gleicher Gesamtanzahl an Differentialarten bei der Einstufung des *Europäischen Pfaffenhütchens*, der *Waldzwenke*, dem *Gelben Buschwindröschen*, dem *Kletten-Labkraut* sowie der *Großen Sternmiere* auseinander. Hingegen gibt es weitgehende Übereinstimmung bei den nach den drei Methoden festgestellten Differentialarten für *Kühle* unter den Arten der Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht (Tab. 4.2-17). In der Tab. 4.2-18 werden die Ergebnisse der auf die *Kühlezeiger* ausgerichteten Vegetationsanalyse wiedergeben.

Tab. 4.2-18: Darstellung der flächenspezifischen Deckungsgrade der Differentialarten der Vegetation für *Kühle* bzw. *kühl-luftfeucht* und ihrer Anzahl

Fläche	Senke	(Unter- bis Mittel-) Hang	(Ober-) Hang	Kuppe
Geländehöhe NHN in m	52–53	49–52	55–60	61–62,5
Gesamtdeckungsgrad (alle Arten und Schichten)	285,12	289,11	217,28	313,73
Deckungsgrad nur Arten DK_F 7 und 8	80,2	143,61	123,02	37,8
Artenzahl DK_F 7 und 8	4	5	4	4
Artenanzahl der Ellenberg'schen Zeiger für <i>Mäßig Wärme</i> -(T=5) <i>Mäßig Wärme</i> bis <i>Kühlezeiger</i> (T=4), <i>Kühle</i> (T=3)	4	6	4	4
Artenanzahl der Ellenberg'schen Zeiger für <i>Frische- bis Feuchtezeiger</i> (F =6) und <i>Feuchte</i> (F=7)	2	3	2	2
Deckungsgrad der „Kühle-Luftfeucht-Zeiger“ der Arealherkunft „subatlantisch–submediterran“ nach Oberdorfer (nur Baumarten)	79,0	108,6	103,0	27,8

Der Tab. 4.2-18 ist eine methodenübergreifende Übereinstimmung in der flächenspezifischen Rangfolge der Deckungsgrade und den flächenspezifischen Artenzahlen der Differentialarten für *Kühle* zu entnehmen, die mit einem Maximum im Unter- bis Mittel-Hang, und abnehmenden Werten in der Senke, dem Ober-Hang bis zur Kuppe verläuft. Fast diametral hierzu verläuft die Flächenbewertung der vier Flächen anhand der Artenzahlen und der Deckungsgrade der *Wärmezeiger* (HOFMANN & POMMER 2013) und der Arealtypenanalyse (OBERDORFER 1990) (Tab. 4.2-19). Die *flächenspezifische* Deckungsgradrangfolge der *Wärmezeiger* lautet (absteigend sortiert) *Kuppe*, *Senke*, *Ober-Hang* und *Unter- bis Mittel-Hang*. In den flächenspezifischen Artenzahlen der wärmezeigenden Differentialarten des dekadischen Feuchtwertes 4 sind die Plätze der *Senke* und des *Ober-Hangs* vertauscht und die Rangfolge entspricht ihrem Geländehöhenwert [Z (m)].

Tab. 4.2-19: Darstellung der flächenspezifischen Deckungsgrade der Differentialarten der Vegetation für (Sommer) Wärme bzw. der Mäßig Wärmezeiger und Trockniszeiger

Fläche	Senke	(Unter- bis Mittel-) Hang	(Ober-) Hang	Kuppe
Geländehöhe NHN in m	52–53	49–52	55–60	61–62,5
Gesamtdeckungsgrad (alle Arten und Schichten)	285,12	289,11	217,28	313,73
Deckungsgrad nur Arten DK _F 4	27,44	0,25	5,04	79,26
Artenzahl DK _F 4	6	5	8	10
Deckungsgrad Ellenberg'sche Zeiger für Mäßig Wärme bis Wärme (T = 6)	62,4	25,3	14,8	59,7
Deckungsgrad Ellenberg'sche Zeiger für Trocknis- bis Frischezeiger (F = 4)	–	0,01	0,2	1
Artenanzahl der Ellenberg'schen Trocknis- bis Frischezeiger (F = 4)	–	1	1	1
Artenanzahl der Ellenberg'schen Mäßig Wärme- bis Wärmezeiger (T = 6)	10	8	6	12
Deckungsgrad der „Sommerwärmezeiger“ nach Oberdorfer (nur Baumarten)	3,2	0,2	2	65,02
Deckungsgrad der Arealherkunft „gemäßigt kontinental“ bzw. „gemäßigt kontinental bis submediterran“ nach Oberdorfer (nur Baumarten)	3,2	0,2	2	65,01

Die bezogen auf die flächenspezifischen Deckungsgrade der ökologischen Zeigerwerte für Mäßig Wärme bis Wärmezeiger (ELLENBERG 2000) ermittelte Temperaturreihe sieht hingegen absteigend sortiert die Senke vor der Kuppe, dem Unter- bis Mittel-Hang und dem Ober-Hang. Diese Temperaturreihe wird durch die Zusatzinformation der Deckungsgrade der ökologischen Trocknis- bis Frischezeiger (F = 4) relativiert, da Trockniszeiger in der Senke, im Unterschied zu den drei anderen Flächen, nicht vorhanden sind. Insofern müssen für die indirekte klimatische Flächenbewertung beide ökologische Zeigerwerte *Ellenbergs* herangezogen werden. In der Tab. 4.2-20 werden die Ergebnisse in Form der nach den drei genannten Verfahren flächenspezifisch berechneten dekadischen Feuchtwerte, den ökologischen Zeigerwerten nach *Ellenberg* sowie den prozentualen Flächenanteilen der Baumarten entsprechend der Arealtypenanalyse aufgelistet.



Abb. 4.2-35: Der Sommerwärmezeiger Feld-Ahorn, wenige Meter südlich der *Kuppe*, Juli 2016

Tab. 4.2-20: Ergebnisse der methodenvergleichenden Vegetationsanalyse

Fläche	<i>Senke</i>	Unter- bis Mittel- <i>Hang</i>	Ober- <i>Hang</i>	<i>Kuppe</i>
Geländehöhe NHN in m	52–53	49–52	55–60	61–62,5
DK_F (Baum-, Strauch-, Kraut-, Moosschicht)	5,6	5,7	5,4	5,3
Ellenberg Temperaturwert (<i>ungewichtet</i>)	5,3	5,3	5,3	5,3
Ellenberg Temperaturwert (<i>gewichtet mit Deckungsgrad</i>)	5,3	5,1	5,1	5,3
Ellenberg Feuchtwert (<i>ungewichtet</i>)	5,6	5,3	5,3	5,3
Ellenberg Feuchtwert (<i>gewichtet mit Deckungsgrad</i>)	5,5	5,3	5,3	5,3
prozentualer Anteil der Baumarten der Klimalage „sommerwarm“ und der Arealherkunft „gemäßigt kontinental“ bzw. „gemäßigt kontinental bis submediterrän“)	3,0	0,2	1,9	62,0
prozentualer Anteil der Baumarten der Klimalage „kühl“ und der Arealherkunft „subatlantisch–submediterrän“)	74,2	99,9	96,0	26,5

Die Ergebnisse der Tab. 4.2-20 werden nachfolgend im Vergleich der Methoden gegenübergestellt und interpretiert:

1. (DK_F-Wert (HOFMANN & POMMER 2013) aufsteigende Sortierung, d. h. Wärmeab- und Feuchtezunahme): *Kuppe* → *Ober-Hang* → *Senke* → *Unter-Hang*

2. aufsteigende Sortierung der Kühlezeiger mit subatlantischem bis submediterrane Klimaareal (OBERDORFER 1990): *Kuppe* → *Senke* → *Ober-Hang* → *Unter-Hang*
3. absteigende Sortierung der Wärmezeiger mit gemäßigt kontinentalem bis submediterrane Klimaareal (OBERDORFER 1990): *Kuppe* → *Senke* → *Ober-Hang* → *Unter-Hang*
4. absteigende Sortierung des ökologischen Zeigerwertes Temperatur (gewichtet) (ELLENBERG 2000): *Kuppe* = *Senke* → *Ober-Hang* = *Unter-Hang*
5. absteigende Sortierung des ökologischen Zeigerwertes Feuchte (gewichtet) (ELLENBERG 2000): *Kuppe* = *Ober-Hang* = *Unter-Hang* → *Senke*

Die Anwendung der drei unterschiedlichen Analysemethoden dieser *Wärme- und Feuchtezeiger* der Vegetation in der *Senke* führte zu einer unterschiedlichen gesamt-klimatischen Bewertung dieser Fläche im Flächenvergleich: Zusammenfassend lässt sich somit eine **Abnahme der Temperatur** und eine **Zunahme der Kühle und Bodenfrische** von der *Kuppe* über den oberen Teil der Fläche *Hang* bis zum unteren Bereich des *Hanges* auf den nicht grundwasserbeeinflussten Vegetationsparzellen anhand der Ergebnisse der Arealtypenanalyse und des dekadischen Feuchtwertes feststellen. Sowohl die fehlenden äquidistanten Abstände der ökologischen Temperatur- und Feuchtezeiger (ELLENBERG 2000) als auch die Einstufung der Winter-Linde als (nur) *Mäßig-Wärmezeiger* lassen feinere mikroklimatische Unterscheidungen der Catena *Kuppe*, oberer Teil des *Hanges* und unterer *Hang*, nicht zu. Die mikroklimatische Charakteristik der unter zeitweilig erhöhtem Grundwassereinfluss stehenden *Senke* ist in der vergleichenden Betrachtung der flächenspezifischen Ergebnisse ein **Sonderfall durch die Kombination von Wärme mit zeitweilig erhöhter Grundfeuchte**.

Kurze Zusammenfassung

- Flächige vegetationskundliche Feinkartierungen, deren Analyse unter Verwendung soziologischer Artengruppen und die nachfolgende Bildung von Artengruppenkombinationen spiegeln den Oberbodenstandortszustand der drei Kalkbuchenbestände differenziert wider.
- Die Standorte der drei soziologischen Artengruppenkombinationen unterscheiden sich signifikant in den Kalktiefen sowie den **DK_{C/N}**- und **DK_{V%}**-Werten, aber nicht in den **DK_F**-Werten.
- Vegetationskartierungen und deren Analyse anhand der *dekadischen Feuchte-* und *Wärmezeiger* der soziologischen Artengruppen (HOFMANN & POMMER 2013), der Zeigerwerte für *Temperatur* und *Feuchte* (ELLENBERG 2000) sowie der baumartenspezifischen *Klimaarealanalyse* (OBERDORFER 1990) charakterisieren die kleinklimatische Standorte wie folgt:
 - **Abnahme** der Temperatur und **Zunahme** von Kühle und Bodenfrische von der *Kuppe* über den *Ober-Hang* bis zum *Unter-Hang*.
 - **Kleinklimatische Sondersituation** durch Kombination von Wärme und zeitweilig erhöhter Grundfeuchte in der *Senke*.
- Auf der *Kuppe* und dem *Ober-* bis *Mittel-Hang* hat sich das *Bingelkraut-Winter-Linden-Buchenwaldökosystem*, auf dem *Mittel-* bis *Unter-Hang* der *Bingelkraut-Buchenwald* und in der *Senke* das *Eschen-Buchenwaldökosystem* herausgebildet.

4.2.7 Binär logistische Regression

Die Ergebnisse der vegetationsanalytischen Klimabewertung (Kapitel 4.2.6.3) und der Analysen der Stammzahldichten der Wiederholungsinventur für die Baumarten Berg-Ahorn, Buche, Sommer- und Winter-Linde (Kapitel 4.2.5) sollen abschließend mithilfe einer binär logistischen Regression statistisch geprüft werden. Der Grundgedanke besteht darin, mit Hilfe eines Regressionsansatzes die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der vier Baumarten Berg-Ahorn, Buche sowie Winter- und Sommer-Linde in der Wiederholungsinventur der drei Untersuchungsflächen zu bestimmen und herauszufinden, welche Einflussgrößen diese Wahrscheinlichkeit beeinflussen. Als Einflussgrößen werden die berechneten Standortsfaktoren

- Kalktiefe (m),
- sowie als indirekte klimatische Einflussgrößen
 - die Geländehöhe [Z (m)],
 - die Exposition¹² und
 - die Hangneigung betrachtet,

die für jeden der 640 Baumexemplare der vier Baumarten berechnet wurden. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der vier Baumarten Berg-Ahorn, Buche, Winter-Linde und Sommer-Linde kann für alle drei Untersuchungsflächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* mit folgender Formel berechnet werden:

$$P(Y_i = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4)}}$$

β_0 - Regressionskonstante

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – sind Regressionskoeffizienten für die vier Standortsfaktoren, wobei gilt:

- bei $\beta_i > 0$ positiver Zusammenhang
- bei $\beta_i < 0$ negativer Zusammenhang
- bei $\beta_i = 0$ Null-Effekt und deshalb Nichtberücksichtigung.

Die Regressionskoeffizienten der einzelnen Standortsfaktoren sind als blockweise geschachteltes Modell einbezogen worden. Damit war ein vergleichbarer Test der Faktoren durch deren Hinzu- oder Wegnahme möglich. Nur bei ihrer durch den Omnibus-Test ausgewiesenen Signifikanz und/oder Ergebnisverbesserung wurden sie in das Modell übernommen. Die bodenchemischen Werte der Tiefenstufe (0–5 cm) wurden in das Modell einbezogen. Sie hatten keine signifikante Wirkung und wirkten nicht ergebnisverbessernd.

4.2.7.1 Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der *Kühlezeiger* Buche und Berg-Ahorn

a.) Das Vorkommen der Buche

Für das Auftreten der Buche in allen drei Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* (als Gesamtkollektiv) konnte unter Berücksichtigung der ermittelten Standortsfaktoren mit folgendem Modell beschrieben werden:

¹² Die im Quantum GIS durch Verschneidung der Baumfußkoordinaten mit dem Geländemodell ermittelte Exposition (Grad) wurde in den Sinus des Winkels umgerechnet, da es sich um eine sogenannte zirkuläre Variable handelt (LEYER & WESCHE 2008). Aufgrund des Mikoreliefs (fehlende Südost- über Süd- bis Südsüdwest-Richtung, Abb. 3.2-1) ist nur der 1. und 4. Quadrant der Sinusfunktion vollständig mit Expositionswerten belegt.

1

$$P(\text{Buche} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(4,256 - 0,133 \cdot Z(m) - 0,481 \cdot \text{Exposition} + 0,443 \cdot \text{Kalktiefe}(m) + 0,069 \cdot \text{Neigung}(\text{Grad}))}}$$

Dieses Modell kann 74,5 % des Vorkommens der Buche in den drei Flächen richtig erklären. Alle vier Standortsfaktoren (Höhenwert, Exposition, Hangneigung und Kalktiefe) wirken signifikant ein (Tab. 4.2-21).

Tab. 4.2-21: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Buche in allen drei Untersuchungsflächen

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	-,133	0,028	0,000
Exposition (sinus)	-,481	0,162	0,003
Kalktiefe (m)	,443	0,280	0,000
Hangneigung (Grad)	,069	0,030	0,020
Konstante	4,256	1,806	0,018

Ein Wuchsstandort mit einem (möglichst) geringen Geländehöhenwert Z (m), einer südwestlichen bis nordwestlichen Hangrichtung (3. und 4. Quadrant) und einer erhöhten Hangneigung sowie als Stammstandortseigenschaft ein tiefer anstehender Kalk sprechen für eine hohe Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Aufwachsens der Buche in der Gesamtheit der drei Untersuchungsflächen. Alle vier Standortsfaktoren wirken hoch signifikant im Modell (Tab. 4.2-21). Durch die Trennung des Gesamtkollektivs in den nicht grundwasserbeeinflussten *Hang* und die *Kuppe* von der Sondersituation der zeitweilig grundwasserbeeinflussten *Senke* und deren getrennte Berechnung lässt sich die Qualität des Modells noch verbessern. 81,6 % des Vorkommens der Buche auf dem *Hang* und der *Kuppe* können mit der folgenden Gleichung richtig erklärt werden:

$$P(\text{Buche} = 1) =$$

1

$$\frac{1}{1 + e^{-(8,407 - 0,190 \cdot Z(m) - 0,325 \cdot (\text{Exposition}) + 0,958 \cdot \text{Kalktiefe}(m) + 0,039 \cdot \text{Neigung}(\text{Grad}))}}$$

Auf den nicht grundwasserbeeinflussten Standorten des *Hangs* und der *Kuppe* beeinflusst in erster Linie (hochsignifikant) ein geringer Höhenwert Z (m) und eine erhöhte Kalktiefe positiv das Vorkommen der Buche. Eine westliche Hangrichtung und eine erhöhte Hangneigung wirken begünstigend, aber deren Signifikanz ist nicht mehr gesichert (Tab. 4.2-22).

Tab. 4.2-22: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Buche auf dem *Hang* und der *Kuppe*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	-,190	0,032	0,000
Exposition (sinus)	-,325	0,219	0,137
Kalktiefe (m)	,958	0,466	0,040
Hangneigung (Grad)	,039	0,034	0,248
Konstante	8,407	2,151	0,000

In der *Senke* sind aufgrund der zeitweiligen Grundwasserbeeinflussung andere Standorts-, und somit Konkurrenzbedingungen gegeben. Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Buche ist hier nur von der Kalktiefe, dem Geländehöhenwert Z (m) und der Hangrichtung abhängig. Die Gerichtetheit der Regressionskoeffizienten (Standortsfaktoren) ist aber eine andere: Im Unterschied zu den beiden Flächen *Kuppe* und *Hang* steigt die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Etablierung der Buche signifikant mit einem möglichst tief anstehenden Kalk, der durch einen großen Geländehöhenwert [Z (m)] (Abb.4.2-36) und einer Ost bis Süd ausgerichteten Exposition begünstigt wird (Tab. 4.2-23). 74,5 % der Buchen können hier richtig mit folgendem Modell vorhergesagt werden:

$$P(\text{Buche} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(19,928 + 0,247 \cdot Z(m) + 3,745 \cdot \text{Kalktiefe}(m) + 0,147 \cdot \text{Exposition})}}$$

Tab. 4.2-23: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Buche in der *Senke*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	,247	0,231	0,286
Kalktiefe (m)	3,745	0,859	0,000
Exposition (sinus)	,147	0,314	0,639
Konstante	-19,928	11,733	0,089

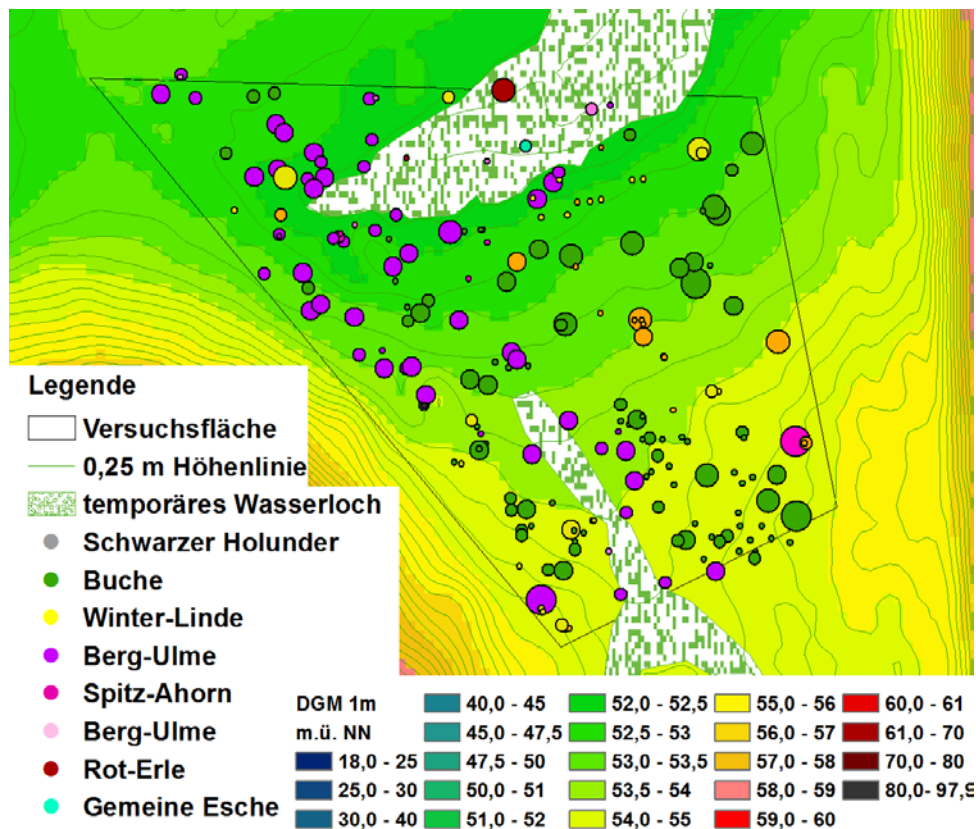


Abb. 4.2-36: Vom Grundwasserflurabstand abhängige baumartenspezifische kleinflächige Baumartenverjüngung in der Sondersituation *Senke* mit Darstellung des digitalen Geländemodells (2 m) den Grenzen der temporären Wasserlöcher, den Höhenlinien im 0,25 m Flurabstand und den Baumfußkoordinaten

b.) Das Vorkommen des Berg-Ahorns

Die standörtliche Präferenz der Pionierbaumart Berg-Ahorn, die als erste beim Wechsel der Baumgeneration in die durch den Zusammenbruch der Altbäume neu entstandenen Lücken hineinwuchs, ist im Vergleich zur Klimaxbaumart Buche schlechter eingrenz- und bestimmbar. Auf allen drei Untersuchungsflächen ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Berg-Ahorns mit dem folgenden Modell beschreibbar (65 % der tatsächlichen Standorte des Berg-Ahorns können richtig vorhergesagt werden) :

$$P(\text{Berg-Ahorn} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(6,140 + 0,098 \cdot Z(\text{m}) - 0,406 \cdot \text{Exposition})}}$$

Hoch signifikant auf die Wahrscheinlichkeit des Aufwachsens des Berg-Ahorns in allen drei Untersuchungsflächen wirken ein (möglichst) großer Geländehöhenwert bei gleichzeitiger Westhanglage (3. und 4. Quadrant der Sinusfunktion) (Tab. 4.2-24).

Tab. 4.2-24: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen des Berg-Ahorns in allen Flächen

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	,098	0,020	0,000
Exposition (sinus)	-,406	0,130	0,002
Konstante	-6,140	1,162	0,000

Für die nicht grundwasserbeeinflussten Standorte des Berg-Ahorns auf der *Kuppe* und dem *Hang* kann sein erfolgreiches Aufwachsen mit dem folgenden Modell spezifischer vorhergesagt werden: (62,1 % sind korrekt hiermit erklärbar).

$$P(\text{Berg-Ahorn} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(7,374 + 0,116 \cdot Z(\text{m}) - 0,719 \cdot \text{Exposition} + 0,048 \cdot \text{Kalktiefe}(\text{m}) + 0,017 \cdot \text{Neigung}(\text{Grad}))}}$$

Auf der *Kuppe* und dem *Hang* beschreiben ein hoher Z-Wert bei einer gleichzeitigen Westgerichtetheit der Hanglage am besten die gegenwärtigen bevorzugten Wuchsräume des Berg-Ahorns. Begünstigend wirken, wenn auch nicht signifikant, eine höhere Hangneigung und eine erhöhte Kalktiefe des Standortes (Tab. 4.2-25).

Tab. 4.2-25: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen des Berg-Ahorns auf der *Kuppe* und dem *Hang*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	,116	0,029	0,000
Exposition (sinus)	-,719	0,162	0,000
Kalktiefe (m)	,048	0,378	0,900
Hangneigung (Grad)	,017	0,029	0,553
Konstante	-7,374	1,960	0,000

In der zeitweilig grundwasserbeeinflussten *Senke* kehrt sich die Gerichtetheit der Regressionskoeffizienten Geländehöhenwert Z (m) und der Hangneigung um, während sie für die Standortsfaktoren Exposition und Kalktiefe beibehalten werden: Ein (möglichst) geringer Höhenwert und ein höher anstehender Kalk erklären hier signifikant die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens des Berg-Ahorns (Abb. 4.2-36). Eine geringere Hangneigung bei Ost- bis Südexposition wirken begünstigend (Tab. 4.2-26). Die Wahrscheinlichkeit der Etablierung eines Berg-Ahorns kann mit folgendem Modell zu 77,3 % richtig vorausgesagt werden:

$P(\text{Berg-Ahorn} = 1) =$

$$\frac{1}{1 + e^{-(34,849 - 0,616 \cdot Z(m) - 1,727 \cdot \text{Kalktiefe}(m) + 0,226 \cdot \text{Exposition} - 0,048 \cdot \text{Neigung(Grad)})}}$$

Tab. 4.2-26: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen des Berg-Ahorns in der *Senke*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	-,616	0,262	0,019
Kalktiefe (m)	-1,727	0,723	0,017
Exposition (sinus)	,226	0,331	0,494
Hangneigung (Grad)	-,048	0,093	0,603
Konstante	34,849	13,453	0,010

4.2.7.2 Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der *Wärmezeiger Sommer- und Winter-Linde*

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der beiden wärmeliebenden Lindenarten lassen sich durch das standortsspezifische Modell im Vergleich zu den beiden *Kühlezeigern* mit einer vergleichsweise sehr hohen Genauigkeit voraussagen.

a.) Das Vorkommen der Sommer-Linde

Die höchste Genauigkeit im Baumartenvergleich, 92,3 % korrekte Voraussage, konnte für das Vorkommen der Sommer-Linde in allen drei Untersuchungsflächen mit der folgenden Modellgleichung berechnet werden:

$$P(\text{Sommer-Linde}=1) = \frac{1}{1 + e^{-(0,616 - 0,032 \cdot Z(m) + 0,578 \cdot \text{Exposition})}}$$

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Sommer-Linde wird signifikant von einem möglichst hohen Expositionswert (Ost- bzw. Südhanglage, da 1. und 2. Quadrant der Sinusfunktion) erklärt, ein möglichst großer Geländehöhenwert [Z] wirkt modellverbessernd (Tab. 4.2-27).

Tab. 4.2-27: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Sommer-Linde in allen Flächen

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Höhenwert Z (m)	-,032	0,037	0,395
Exposition (sinus)	,578	0,227	0,011
Konstante	-,616	2,116	0,771

Durch die separate Wahrscheinlichkeitsberechnung der Sommer-Linden auf dem *Hang* und der *Kuppe* lässt sich die Modellaussage auf 95,1 % verbessern¹³. Die Gerichtetheit der im Modell berücksichtigten beiden Standortsfaktoren Exposition und Geländehöhenwert [Z] ändern sich nicht (Tab. 4.2-28).

$$P(\text{Sommer-Linde}=1) = \frac{1}{1 + e^{-(-7,539 + 0,079 \cdot Z(m) + 0,668 \cdot \text{Exposition})}}$$

Tab. 4.2-28: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Sommer-Linde auf der *Kuppe* und dem *Hang*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	,079	0,074	0,284
Exposition (sinus)	,668	0,321	0,038
Konstante	-7,539	4,386	0,086

Das Modell für das Vorkommen der Sommer-Linde in der *Senke* lautet:

$$P(\text{Sommer-Linde}=1) = \frac{1}{1 + e^{-(-80,021 + 1,563 \cdot Z(m) - 3,343 \cdot \text{Kalktiefe}(m))}}$$

Es konnten 90 % der Sommer-Linden-Vorkommen richtig vorhergesagt werden. Im Erklärungsmodell für die *Senke* beeinflussen ein möglichst hoher Geländehöhenwert und ein hoch anstehender Kalk positiv die Auftretenswahrscheinlichkeit der Sommer-Linde (Tab. 4.2-29).

Tab. 4.2-29: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Sommer-Linde in der *Senke*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Höhenwert Z (m)	1,563	0,357	0,000
Kalktiefe (m)	-3,343	0,849	0,000
Konstante	-80,021	18,366	0,000

b.) Das Vorkommen der Winter-Linde

Für alle drei Untersuchungsflächen ist die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Winter-Linde mit knapp 91 % richtiger Aussagen mit folgendem Modell vorherzusagen:

$$P(\text{Winter-Linde} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(-5,567 + 0,079 \cdot Z(m) + 0,621 \cdot \text{Exposition} - 1,032 \cdot \text{Kalktiefe}(m))}}$$

Ein großer Geländehöhenwert, eine Ost- bis Südexposition, ein hoch anstehender Kalk sowie eine geringe Hangneigung beeinflussen die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens positiv. Exposition, Kalktiefe und mit gewissen Einschränkungen die Hangneigung wirken signifikant, der Höhenwert begünstigend (Tab. 4.2-30).

¹³ Kritisch muss angemerkt werden, dass der Stichprobenumfang der Sommer-Linden den Grenzwert 50 unterschreitet.

Tab. 4.2-30: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Winter-Linde in allen Flächen

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Höhenwert Z (m)	,079	0,046	0,083
Exposition (sinus)	,621	0,196	0,002
Kalktiefe (m)	-1,032	0,423	0,015
Hangneigung (Grad)	-5,567	2,935	0,058
Konstante	,079	0,046	0,083

Mit der getrennten Berechnung der binär logistischen Regression der Vorkommen der Winter-Linde für die Flächen *Hang* und *Kuppe* lässt sich das Modellergebnis nicht verbessern, es konnten ebenfalls knapp 91 % mit folgendem Modell richtig vorhergesagt werden:

P (Winter-Linde) =

$$\frac{1}{1 + e^{-(-16,939 + 0,312 \cdot Z(m) + 0,286 \cdot Exposition - 5,342 \cdot Kalktiefe(m) + 0,041 \cdot Neigung(Grad))}}$$

Die Gerichtetheit und Signifikanz der Regressionskoeffizienten auf den nicht grundwasserbeeinflussten Standorten ist genauer herausgearbeitet worden: Ein hoher Z-Wert, ein hoch anstehender Kalk erklären hoch signifikant das Auftreten der Winter-Linde. Eine östliche bis südliche Exposition und eine größere Hangneigung können begünstigend wirken (Tab. 4.2-31).

Tab. 4.2-31: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Winter-Linde auf der *Kuppe* und dem *Hang*

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Höhenwert Z (m)	,312	0,143	0,030
Exposition (sinus)	,286	0,270	0,291
Kalktiefe (m)	-5,342	1,161	0,000
Hangneigung (Grad)	,041	0,063	0,510
Konstante	-16,939	9,219	0,066

Die Wahrscheinlichkeit der Etablierung der Winter-Linde in der *Senke* kann mit folgender Regressionsgleichung beschrieben werden:

$$P(\text{Winter-Linde}=1) = \frac{1}{1 + e^{-(35,358 - 0,708 \cdot Z(m))}}$$

Auch hier sind knapp 91 % der Angaben richtig. Als Regressionskoeffizient erklärt einzig der Geländehöhenwert [Z] das Vorkommen. Im Unterschied zur *Kuppe* und zum *Hang* beeinflusst ein möglichst niedriger Höhenwert die Auftretenswahrscheinlichkeit der Winter-Linde in der *Senke* positiv (Tab. 4.2-32 und Abb. 4.2-36).

Tab.4.2-32: Werte der Regressionskoeffizienten für das Vorkommen der Winter-Linde in der Senke

Standortsfaktor	Regressionskoeffizient	Standardfehler	P-Wert
Geländehöhenwert [Z]	-,708	0,334	0,034
Konstante	35,358	17,739	0,046

Kurze Zusammenfassung

- Mithilfe binär logistischer Regressionsgleichungen, in der die vier Regressionskoeffizienten für die Standortsfaktoren *Kalktiefe*, *Geländehöhe*, *Exposition* und *Hangneigung* stehen, lässt sich der Einfluss dieser Standortsfaktoren auf das Vorkommen der Baumarten Buche, Sommer- und Winter-Linde sowie Berg-Ahorn statistisch prüfen und die Wahrscheinlichkeit ihres Vorkommens vorhersagen.
- Durch die getrennte Berechnung der Regressionsgleichungen für die Sondersituation der grundfeuchten *Senke* lässt sich das Modell verbessern. Folgende Wirkungen der Regressionskoeffizienten konnten für die Erklärung des Vorkommens der Hauptbaumarten beobachtet werden (Tab. 4.2-33):

Tab.4.2-33: Beobachtete positive (+) oder negative (-) Gerichtetheit der Regressionskoeffizienten für Kalktiefe, Geländehöhe, Exposition und Hangneigung
(* Signifikanz gegeben; ohne Zusatzzeichen besteht eine begünstigende Wirkung; „0“ - es besteht kein Einfluss)

Baumart	Fläche	Wirkung des Regressionskoeffizienten			
		Geländehöhe	Kalktiefe	Exposition	Hangneigung
Buche	<i>Kuppe</i>	(-)*	(+)*	West	(+)
	<i>Hang</i>				
	<i>Senke</i>	(+)	(+)*	Ost bis Süd	
Winter-Linde	<i>Kuppe</i>	(+)*	(-)*	Ost bis Süd	(+)
	<i>Hang</i>				
	<i>Senke</i>	(-)*	0	0	0
Sommer-Linde	<i>Kuppe</i>	(+)	0	Ost bis Süd*	0
	<i>Hang</i>				
	<i>Senke</i>	(+)*	(-)*	0	0
Berg-Ahorn	<i>Kuppe</i>	(+)*	(+)	West*	(+)
	<i>Hang</i>				
	<i>Senke</i>	(-)*	(-)*	Ost bis Süd	(-)

4.2.8 Zusammenfassende Diskussion der Bestockungsveränderungen

Waldkundlich sind die in den vergangenen 54 Jahren beim Wechsel in die neue Waldgeneration neu entstandenen Baumartenmischungen Ergebnis standortsspezifischer intra- und interspezifischer Auslese- und Konkurrenzbeziehungen, die zur Herausbildung von drei unterschiedlichen Waldökosystemeinheiten führten (HOFMANN & POMMER 2013, 24 ff.; Abb. 4.2-37).

1. Reliefbedingt bildete sich auf den höchsten Erhebungen, repräsentiert durch die Versuchsfläche *Kuppe* und den oberen Teilen der Fläche *Hang*, der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* heraus (HOFMANN & POMMER 2013, 354 f.). In diesem bestimmen auf kalkhaltigen, anhydromorphen Standorten (Abb. 4.1-1) unter einem Schirm von Winter- und Sommer-Linde, Buche, Hainbuche, Berg- und Spitz-Ahorn und Gemeiner Esche (sowie Berg-Ulme und Schwarzem Holunder in der 2. und 3. Baumschicht in der räumlichen Nähe zu sich zersetzendem liegenden Totholz) eine artenreiche Bodenvegetation, u. a. mit *Scharbockskraut* sowie den wärmeliebenden Arten *Gelbes Windröschen*, *Leberblümchen*, *Frühlingsplatterbse* und *Knoblauchsrauke* den Frühljahraspekt. Im Sommer dominiert das namensgebende *Bingelkraut* die Bodenflora; *Giersch*, *Goldnessel*, leichte Sommerwärmezeiger wie *Sternmiere* und *Waldzwenke* sowie die *Brennnessel* sind beigemischt. Auf der *Kuppe* und dem Ober-*Hang* hat sich kleinklimatisch ein im Flächenvergleich etwas wärmeres und trockeneres Mikroklima herausgebildet, das anhand der Analyse der Bodenvegetation und der Baumartenverjüngung unter Nutzung der Zeigerwerte für Wärme und Feuchte (ELLENBERG 2000), der Wärmezeiger der 4. Hauptgruppe (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.) sowie der baumartenspezifischen Klimaarealanalyse (OBERDORFER 1990), belegbar ist (Tab. 4.2-17 und 4.2-18). Die Vegetationsanalysen bestätigen die an einem NO- und SW-*Hang* in einem Kalkbuchenwald der Schwäbischen Alb durch umfangreiche meteorologische Messungen unterhalb des Kronendaches gestützte Feststellungen, dass die bodennahe Lufttemperatur auf dem NO-*Hang* deutlich kühler als auf dem SW-*Hang* war und dies z. B. zur Ausbildung spezifischer Vegetation führt (HOLST ET AL. 2001, 10 ff.). Die bekannte Tatsache, dass sich innerhalb eines anscheinend einheitlichen Klimabereichs auf engem Raum oftmals sehr beträchtliche Unterschiede in Bezug auf Temperatur, Luftbewegung und relative Feuchtigkeit feststellen lassen, und dies sich in einem Wechsel der Vegetation abzeichnet, war schon seit langem wissenschaftlich belegt (KRAUS 1904). Seinen unmittelbaren Ausdruck findet das im Flächenvergleich zu Wärme und mehr Trockenheit tendierende Mikroklima auf den höchsten Erhebungen des Naturwaldes in der eingeschränkten Konkurrenzkraft der Buche. Sie, die den Ausgangsbestand zum Zeitpunkt der Erstinventur im Jahre 1958 flächig dominierte (Abb. 4.2-1 und 4.2-26, links), verjüngte sich nur noch als Mischbaumart mit 14 % Anteil an der Gesamtstammanzahl und dies tendenziell in den östlichen und westlichen Randbereichen der *Kuppe* und des Ober-*Hangs* (Abb. 4.2-26, rechts). Ihr gegenwärtiger in der neuen Waldgeneration beobachteter Bestandeshöhen-Wachstumsverlauf als Indikator der interspezifischen Konkurrenzkraft verläuft exakt auf dem Niveau der Sommer- und Winter-Linde und wird von dem der Hainbuche und des Berg-Ahorns übertroffen (Abb. 4.2-15), so dass von der Herausbildung eines *echten Buchenmischwaldes* auszugehen ist (HOFMANN & POMMER 2013, 354). Unter den geschilderten mikroklimatischen Bedingungen kann mit Hilfe einer binär logistischen Regressionsgleichung, die die gegenwärtigen Koordinaten der Naturverjüngung sowie als Standortsfaktoren das Geländemodell, die Kalktiefe, Hangneigung und Exposition berücksichtigt, die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Aufwachsens der Hauptbaumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde in diesem Buchenmischwald modellhaft abgebildet werden. Dabei beschreiben die beiden hochsignifikanten Regressionskoeffizienten Geländehöhenwert Z [m] (mit negativer Wirkung) und die Kalktiefe [m] (positive Ausrichtung) sowie der begünstigende (aber nicht signifikante) positive Einfluss der Hangneigung und der Exposition die der Buche im interspezifischen Konkurrenzkampf um Licht zusagenden Standortbedingungen recht genau.

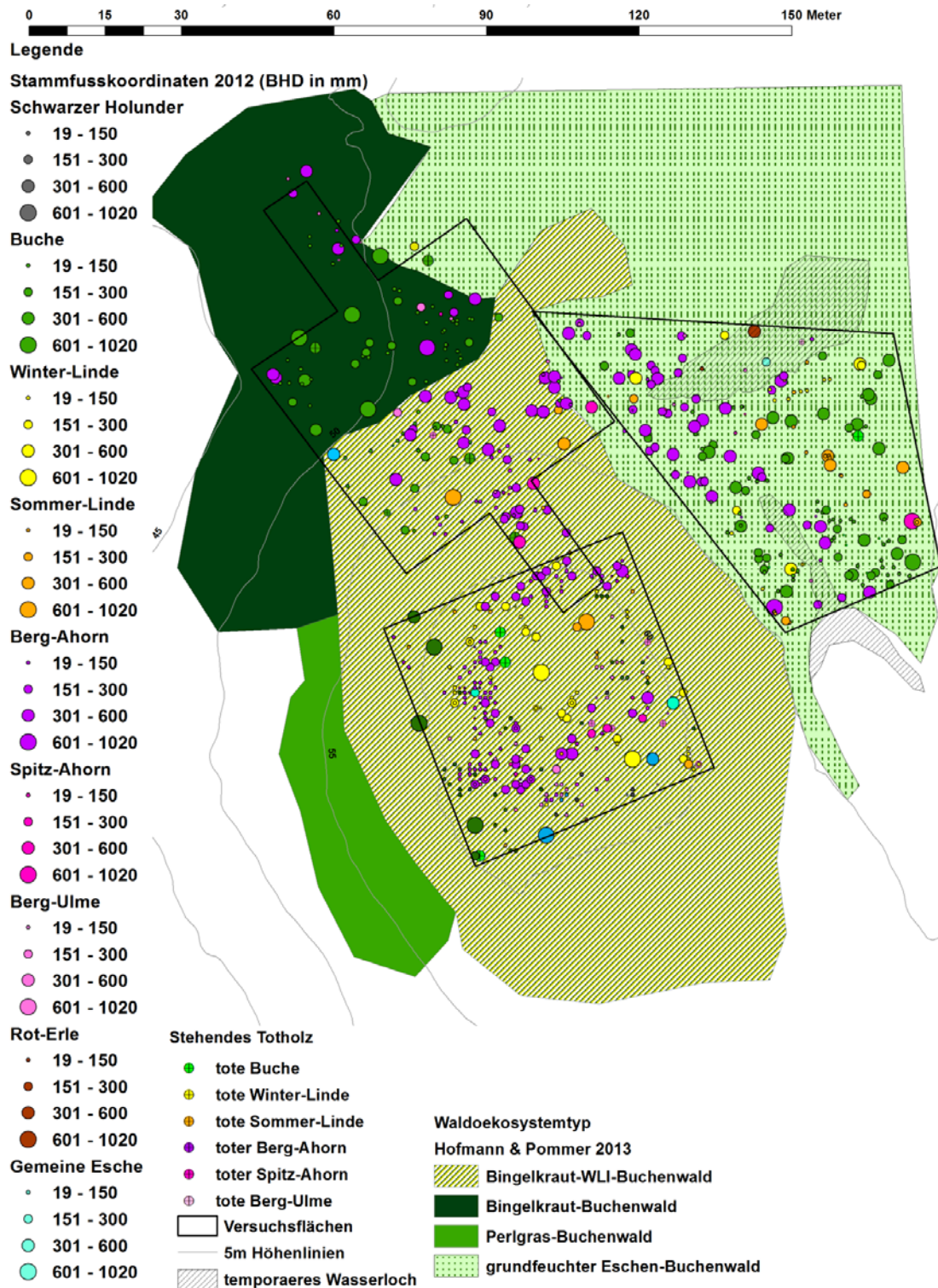


Abb. 4.2-37: Waldökosystemtypen in den Untersuchungsflächen im Faulen Ort

Konträr hierzu kann mittels eines möglichst hohen Geländehöhenwertes Z [m] sowie einer südlichen Exposition (und für die Winter-Linde zusätzlich hoch anstehender Kalk) das Auftreten der beiden Lindenarten modellhaft mit der binär logistischen Regressionsgleichung sehr genau vorhergesagt werden.

2. Bei zunehmender Luftfeuchte und Luftkühle geht unterhalb der mittleren Anteilflächen des *Hangs* dieses Waldökosystem in den Binkelkraut-Buchenwald über, in dem die Buche und der Berg-Ahorn die alleinige bestandesbildende Kraft besitzen (HOFMANN & POMMER

2013, 369 ff.). Temporär in der räumlichen Nähe zu zersetztem liegenden Totholz sind für wenige Jahrzehnte die Berg-Ulme und der Großstrauch Schwarzer Holunder beigemischt. In der Bodenvegetation ist mit dem Auftauchen der *Kühlezeiger Zwiebelzahnwurz*, *Berg-Ehrenpreis* und *Mittleren Lerchensporn* und dem Rückgang der *Wärmezeiger Leberblümchen*, *Frühlingsplatterbse* und *Knoblauchsrauke* ein Vegetationswandel erkennbar, der durch die Analyse der Bodenvegetation und der Baumartenverjüngung unter Nutzung der Zeigerwerte für Kühle und Feuchte (ELLENBERG 2000), der Kühlezeiger der 7. und 8. Hauptgruppe (HOFMANN & POMMER 2013) sowie der baumartenspezifischen Klimaarealanalyse (OBERDORFER 1990) feststellbar ist (Tab. 4.2-16 und 4.2-18). Die Buche ist unter diesen mikroklimatischen Bedingungen im Bestandeshöhenwachstum dominierend (Abb. 4.2-16) und liegt im Bestandesvergleich um etwa 5 m über dem der Buchen auf der *Kuppe* und dem Mittel- bis *Oberhang* des benachbarten Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldökosystems (Abb. 4.2-14). Sie verjüngte sich erfolgreich im Bereich des Mittel- bis Unterhangs und behielt hier auch ihren Verbreitungsschwerpunkt (Abb. 4.2-26). Das luftkühle Mikroklima der unteren Lagen dieses WNW-*Hangs* führte zur Herausbildung eines Kalk-Buchenwaldes, in der als gleichwüchsige Mischbaumart mit Pionierfunktion nur der Berg-Ahorn beigemischt ist. Dieser verjüngte sich, das vorhandene Lückenangebot nutzend, seit 1968 hangaufwärts bis auf die *Kuppe*. Die der Buche im Mittel- bis Unterhang zusagenden Standortbedingungen werden durch die beiden hochsignifikanten Regressionskoeffizienten Geländehöhenwert Z [m] (mit negativer Wirkung) und die Kalktiefe [m] (positive Ausrichtung) sowie dem begünstigenden (aber nicht signifikanten) positiven Einfluss der Hangneigung und der Exposition (Westlage) in der binär logistischen Regressionsgleichung sehr treffend beschrieben.

3. In den tieferen Lagen im Osten des Naturwaldes, repräsentiert durch die Untersuchungsfläche *Senke*, hat sich in einer grundfeuchten Tallage das Waldökosystem des kalkliebenden Eschen-Buchenwaldes herausgebildet (HOFMANN & POMMER 2013, 365 ff.). Kennzeichnend für dieses Waldökosystem ist ein üppiger Frühljahraspekt mit *Scharbockskraut*, *Lungenkraut*, *Lerchensporn* (bis hin zum *Wechselblättrigen Milzkraut* in den feuchtesten Lagen) mit gutwüchsigen Mischbeständen aus Buche, Berg- und Spitz-Ahorn, Winter- und Sommer-Linde, Gemeiner Esche sowie Berg-Ulme in der 2. Baumschicht.¹⁴ Anhand der Analyse der Vegetation und Baumartenverjüngung lässt sich das Mikroklima der *Senke* im Vergleich zur *Kuppe* bei ähnlicher Sommerwärmeausprägung als grundfeuchter und im Vergleich zum *Unter-* bis *Mittelhang* als deutlich sommerwärmer charakterisieren (ELLENBERG 2000; OBERDORFER 1990; HOFMANN & POMMER 2013; Tab. 4.2-16; 4.2-17; 4.2-18). Die interspezifischen Konkurrenzbeziehungen der Baumarten Buche, Sommer- und Winter-Linde, Spitz- und Berg-Ahorn werden in der *Senke* nicht durch die Kombination aus Sommerwärme und Gefahr des zeitweiligen Wassermangels in der Hauptwachstumsperiode, wie auf der *Kuppe*, sondern durch Wärme und zeitweilige Staunässe, z. B. durch Frühljahrsrückstau und Starkregenereignisse, beeinflusst. Aufgrund der interspezifisch konkurrenzstarken Wuchsleistung der Buche (Abb. 4.2-17), die in der *Senke* über dem der Winter- und Sommer-Linde und auf dem Niveau des Spitz- und Berg-Ahorns liegt, kommt der

¹⁴ Außerhalb der Untersuchungsflächen hat sich westlich der Kuppe auf einem Westhang unter einem reinen Buchenbestand kleinflächig der Perlgras-Buchenwald, der durch eine alte *Mansik*-Vegetationsdauerbeobachtungsparzelle erfasst wird, etabliert.

baumartenspezifischen Toleranz gegenüber zeitweiligen erhöhten Grundwasserstand die Bedeutung eines Auslese Kriteriums für den konkreten Standort zu. Dies scheint die Hauptursache für das kleinflächige, größtenteils baumartenreine Nebeneinander von Baumartengruppen zu sein, die z. B. eine Bindung des erfolgreichen Aufwachsens des Berg-Ahorns und der Winter-Linde an Teilflächen erhöhten Grundfeuchte und der Buche und Sommer-Linde an Areale mit tieferen Grundwasserstand erkennen lässt (Abb.4.2-8 und 4.2-36). Diese Vermutung wird durch die unterschiedliche Ausrichtung des begünstigend und zum Teil signifikant wirkenden Geländehöhenwerts Z [m] im baumartenspezifischen binär logistischen Regressionsmodell bestätigt: Das Vorkommen der Buche und der Sommer-Linde wird durch einen möglichst großen Geländehöhenwert Z [m] modellhaft in der *Senke* erklärt. Im Unterschied zur Sommer-Linde (hoch anstehender Kalk) bevorzugt die Buche jedoch Standorte mit einem tief anstehenden Kalk. Hingegen ist ein möglichst niedriger Geländehöhenwert Z [m] als alleiniges Standortskriterium für das Aufwachsen der Winter-Linde und für das Vorkommen des Berg-Ahorns (bei letzterem wirkt außerdem begünstigend eine Ost-Süd-Exposition) im Regressionsmodell bestimmend.

4. Die Verjüngung der Baumarten erfolgte kleinflächig, nicht einzelstammweise (Abb. 4.2-8). Wie die Grundrissdarstellung des *Hangs* (Abb. 4.2-1) und die Luftbildzeitreihen-Auswertung belegen, begann die Auflösung des Buchenoberstands in den 1960er Jahren am *Hang*, in dessen mittlerem Teilbereich (Abb. 4.2-18). Das entstehende Lückendargebot nutzend, verjüngte sich zunächst der Berg-Ahorn, der eine Pionierfunktion innehatte, hangaufwärts. Ihm folgten zeitlich versetzt die Hauptbaumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie die Hainbuche. Infolge der beiden Orkane vom Herbst 1972 und Januar 1976 griffen die Alters- und Zerfallsprozesse ab den 1980er Jahre nacheinander auf die *Senke*, den *Ober-Hang* und die *Kuppe* über (Abb. 4.2-20). Dies ist u. a. aus dem stark angestiegenen Jahrringzuwachs der Alt-Buchen 21, 25 und 26 der beiden Untersuchungsflächen *Hang* und *Kuppe* ableitbar (Abb. 4.2-25). Anfang der 1990er Jahre sind in allen drei Untersuchungsflächen nur noch einzelne Überhälter der alten Baumgeneration vorhanden, die aus dem neu entstandenen, flächen- und wuchsklassenspezifischen Kronendach herausragen (Abb. 4.2-22). Am weitesten in der Bestandesentwicklung vorangeschritten ist der *Mittelhang*, wo insbesondere Exemplare des Berg-Ahorns erste Baumholzdimensionen erreicht haben. Dem schließt sich in Richtung *Oberhang* ein Stangenholz an, das am Rande der *Kuppe* in das Dickungsstadium übergeht. Die *Kuppe* befindet sich im Dickungsstadium und in der *Senke* hat sich flächig ein Stangenholz etabliert. Im Zeitraum 1991 bis zur Wiederholungsinventur 2012 vollzogen die Bestände einen Übergang in die nächstfolgende Wuchsklasse, d. h., von der Dickung zum Stangenholz auf der *Kuppe* und dem *Ober-Hang*, vom Stangenholz zum jungen Baumholz in der *Senke* und zum mittleren Baumholz am *Hang*. Der heterogene, flächenspezifische Grundflächenmittelstamm der neuen Waldgeneration beschreibt den gegenwärtigen Waldzustand sehr anschaulich (Tab. 4.2-3). Die Zahl der in den Flächen vorhandenen Überhälter aus Buche, Hainbuche, Sommer- und Winter-Linde nahm kontinuierlich weiter ab. Die wenigen noch vorhandenen Buchenüberhälter mit einer Altersspanne von ca. 280 bis 380 Jahren zeigen äußerlich mit sichtbaren Pilzkonsolen starke Auflösungserscheinungen.
5. Flächenübergreifend hat sich in der Interaktion von Standort (insbesondere der Kalktiefe und der Stammfeuchte) und der Baumartenzusammensetzung infolge des vertikalen (baumarten-spezifischer Basenpumpeffekts) und lateralen Nährstoff- und Kalktransports

(Kalktransport infolge Windwurfs an die Oberfläche und dessen Weitertransport durch Insekten, Wild, Vögel und Kleinsäuger) ein Vegetationszustand herausgebildet, der zur Bewertung der Oberbodenzustände in drei soziologische Artengruppenkombinationen zusammengefasst werden kann (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.): *Mercurialis-Lamium*, der *Aegopodium-Lamium* und *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination. Zwischen diesen gibt es signifikante Unterschiede in den beobachteten Kalktiefen sowie den dekadischen Oberbodentrophiewerten $DK_{C/N}$ und $DK_{V\%}$. Die Standorte der *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination können im Oberbodenzustand als stickstoffreich bis stickstoffkräftig, basenreich bis basenkräftig und mäßig feucht bis mäßig trocken gekennzeichnet werden. Kalk steht beim Vorkommen dieser Artengruppenkombination bei einem Medianwert von 0,9 m oberflächennah an. Das Vorkommen der *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination signalisiert im Oberboden einen ebenfalls stickstoffreich bis -kräftigen, nur basenkräftigen, und mit feucht bis mäßig frisch etwas frischeren Zustand. Die Kalktiefe für diese Artengruppenkombination weist einen Medianwert von 1,25 m auf. Die *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination steht für stickstoffkräftige und basenkräftige Oberbodenzustände sowie tief anstehenden Kalk in den Untersuchungsflächen.

6. Der in den Erstinventuren dokumentierte und von der Buche dominierte Waldzustand war forstlich überprägt. Er entstand aus einem von der Trauben-Eiche beherrschten Trauben-Eichen-Buchenmischbestand, der durch den kontinuierlichen Aushieb der Trauben-Eiche bis Mitte des 19. Jahrhunderts in einen zweischichtigen Buchenbestand überführt wurde, in der 50- bis 70-jährige Buchen neben alten (bis 200 Jahre) vorherrschten sowie einzelne Exemplare der Trauben-Eiche, Hainbuche, des Ahorns, Pappeln und Ulmen vorhanden waren.

4.3 Bodenkundliche Ergebnisse

Nach der Ermittlung der Kalktiefen zur Klärung der Stammeigenschaften der Böden in den Untersuchungsflächen (**Abb. 4.1-1**), der räumlichen Visualisierung und geostatistischen Auswertung der Standorte der in den Wiederholungsinventuren aufgefundenen Naturverjüngung, in Verbindung mit der Darstellung und Analyse der kartierten Bodenvegetation über die soziologischen Artengruppen (**Abb. 4.2-8** und **4.2-29**), sollen nachfolgend sowohl die Ergebnisse der Oberbodenbeprobung (Tiefenstufe 0–5 cm) wiedergegeben und mögliche Zusammenhänge zur kartierten Vegetation, zur ermittelten Kalktiefe als auch zu den sich herausgebildeten Waldökosystemen aufgezeigt werden.

4.3.1 Vergleich der Befunde der Vegetationsanalyse mit den bodenkundlichen Ergebnissen

Der Tab. 4.3-1 ist die deskriptive Statistik der Analysenergebnisse der im 10 m x 10 m Raster der Tiefenstufe 0–5 cm erhobenen 95 Einzelproben zu entnehmen.

Tab. 4.3-1: Deskriptive Statistik der Laborergebnisse Tiefenstufe (0–5 cm)

Tiefenstufe 0–5 cm	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl der Proben
pH _{KCl} -Wert	5,5	0,85	95
N _{org} in % von C _{org}	7,08	0,54	95
Gesamtstickstoff (%)	0,21	0,06	95
Gesamtkohlenstoff (%)	2,98	0,91	95
C/N-Verhältnis	14,21	1,14	95

Diese bodenchemischen Werte entsprechen den typischen Eigenschaften einer Bodenbildung (Fahlerde, Parabraunerde, Tieflehm-Fahlerde, Staugley-Fahlerde) aus Geschiebemergel im nordostdeutschen Tiefland mit dem Humuszustand Mull (RIEK & STÄHR 2004, 92 f.). Die pH_{KCl}-Werte befinden sich mit dem Mittelwert von 5,5 überwiegend im Silikatpufferbereich (mit den Maximalwerten im Carbonat- und den Minimalwerten im Austauschpufferbereich). Die C/N-Verhältnisse sind bei einem Mittelwert von 14,21 und einer Standardabweichung von 1,14 als *mäßig eng* einzuschätzen (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, 174 f.). Die Zuordnung der rasterbezogenen Analyseergebnisse des Oberbodens (0–5 cm Tiefenstufe) zu den soziologischen Artengruppenkombinationen und die Varianzanalyse der in der Tab. 4.3-1 aufgeführten bodenchemischen Werte ergab **keine** statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen der *Mercurialis-Lamium*, der *Aegopodium-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination (Tab. 4.3-2).

Tab. 4.3-2: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der Oberbodenbeprobungsergebnisse, gruppiert nach den soziologischen Artengruppenkombinationen

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	P-Wert
pH _{KCl} -Wert	zwischen den Gruppen	0,000	2	0,000	0,355	0,702
N _{org} in % von C _{org}	zwischen den Gruppen	1,049	2	0,525	1,88	0,159
Gesamtstickstoff	zwischen den Gruppen	0,004	2	0,002	1,137	0,325
Gesamtkohlenstoff	zwischen den Gruppen	1,325	2	0,663	1,15	0,321
C/N-Verhältnis	zwischen den Gruppen	3,689	2	1,844	1,453	0,239

Anhand der Korrelationsanalyse nach Pearson konnte aber ein schwacher Zusammenhang zwischen der soziologischen Artengruppenkombination und dem Gesamtstickstoffgehalt festgestellt werden (Tab. 4.3-3).

Tab. 4.3-3: Ergebnis der Korrelationsanalyse

		Gesamtstickstoff (%)
soziologische Artengruppenkombination	Korrelation (Pearson)	0,232*
	Signifikanz (zweiseitig)	0,023

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (zweiseitig) signifikant.

Der Oberboden, der von den beiden soziologischen Artengruppenkombinationen *Mercurialis-Lamium* und *Aegopodium-Lamium* bedeckt ist, weist im Vergleich zur *Melica uniflora-Lamium*

Artengruppenkombination mit einem engeren C/N-Verhältnis (Mull statt Mull bis mullartiger Moder), einem höheren pH_{KCl} -Wert und einem prozentual höheren Gesamtstickstoff zum Gesamtkohlenstoffverhältnis (N_{org} in % von C_{org}) bodenchemisch andere Werte auf (Tab. 4.3-4 und Abb. 4.3-1). Dies bestätigt die mittels Analyse der soziologischen Artengruppenkombinationen ermittelten und statistisch abgesicherten Unterschiede in den dekadischen Trophiewerten zwischen den drei soziologischen Artengruppenkombinationen (Abb. 4.2-33 und Tab. 4.2-8 bis 4.2-11). Eine räumliche Übereinstimmung der geringeren Stickstoffwerte bzw. weiteren C/N-Verhältnisse mit dem Areal der kartierten *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination ist sowohl im Nordwesten der *Kuppe* als auch im Osten der *Senke* festzustellen. Die Mittelwerte der bodenchemischen Analyseergebnisse sind in der Tab. 4.3-4 zusammengefasst.

Tab. 4.3-4: Übersicht über die bodenchemischen Mittelwerte der soziologischen Artengruppenkombinationen

	<i>Mercurialis-Lamium</i>	<i>Aegopodium-Lamium</i>	<i>Melica uniflora-Lamium</i>
	Mittelwerte der Tiefenstufe (0–5 cm)		
pH_{KCl}-Wert	5,8	5,4	5,1
N_{org} in % von C_{org}	7,14	7,06	6,78
Gesamtstickstoff (%)	0,21	0,19	0,21
Gesamtkohlenstoff (%)	2,94	2,76	3,14
C/N-Verhältnis	14,12	14,23	14,78

Die anhand der Analyse der soziologischen Artengruppenkombinationen der Vegetation in den vier Parzellen 52 (*Kuppe*) und 55 (Unter- bis Mittel-*Hang*) – beide *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination – sowie Parzelle 48 (*Senke*) – *Aegopodium-Lamium* Artengruppenkombination – getroffene Bewertung des Oberbodentrophiezustandes für diese beiden Artengruppenkombinationen als stickstoffreich bis stickstoffkräftig wird mit den Mittelwerten des Verhältnisses vom Gesamtstickstoff zum Gesamtkohlenstoff in Prozent (N_{org} in % von C_{org}) von **7,1**, dem C/N-Verhältnis um **14** sowie den pH_{KCl} -Werten um **5,5** (Silikatpufferbereich) mit den Laboranalysewerten untersetzt. Der anhand der Vegetationsanalyse der Parzelle 51 – *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination – als etwas schlechter eingestufte Oberbodenzustand wird mit den Mittelwerten der Labordaten, dem weiteren C/N-Verhältnis von annähernd **15**, dem prozentualen Anteil des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff (N_{org} in % von C_{org}) von **6,78** sowie dem pH_{KCl} -Wert von **5,07** (an der Grenze zum Austauscherpufferbereich) bestätigt.

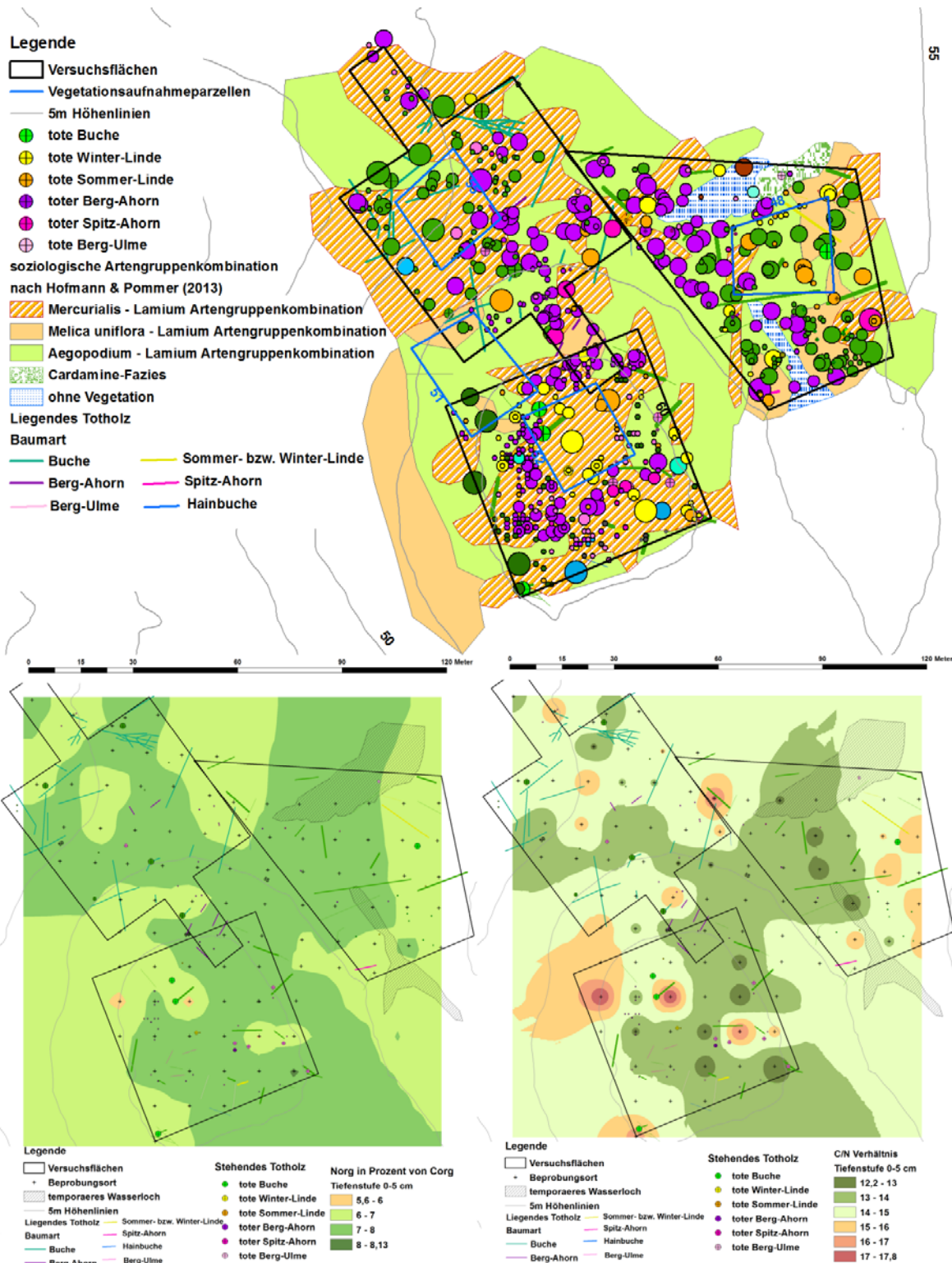


Abb. 4.3-1: Ergebniskarte der flächigen Vegetationskartierung vom Juni 2014 mit Darstellung der soziologischen Artengruppenkombination (oben) und der mittels Inverser Distanzwichtung der interpolierten Analysewerte des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffs am Gesamtkohlenstoff (links unten) sowie des interpolierten C/N-Verhältnisses (rechts unten)

4.3.2 Vergleich der ermittelten Kalktiefen mit dem pH_{KCl} -Wert des Oberbodens

Ein räumlicher Vergleich der festgestellten Kalktiefen (Abb. 4.1-1) mit den im Labor analysierten und im GIS visualisierten pH_{KCl} -Werten lässt sowohl die Quellen als auch die Ausbreitungsrichtungen für die besseren, sehr schwach sauren, neutralen bis schwach alkalischen pH_{KCl} -Werte erkennen (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, 174; Abb. 4.3-2). Visuell ist hier der in der Korrelationsanalyse nach *Pearson* aufgedeckte Zusammenhang zwischen dem Geländehöhenwert Z [m] und der Kalktiefe und zwischen der Hangneigung (Grad) und der Kalktiefe sowie zwischen dem Geländehöhenwert Z [m] und dem pH_{KCl} -Wert und zwischen der Exposition und dem pH_{KCl} -Wert erkennbar Tab. 4.3-5.

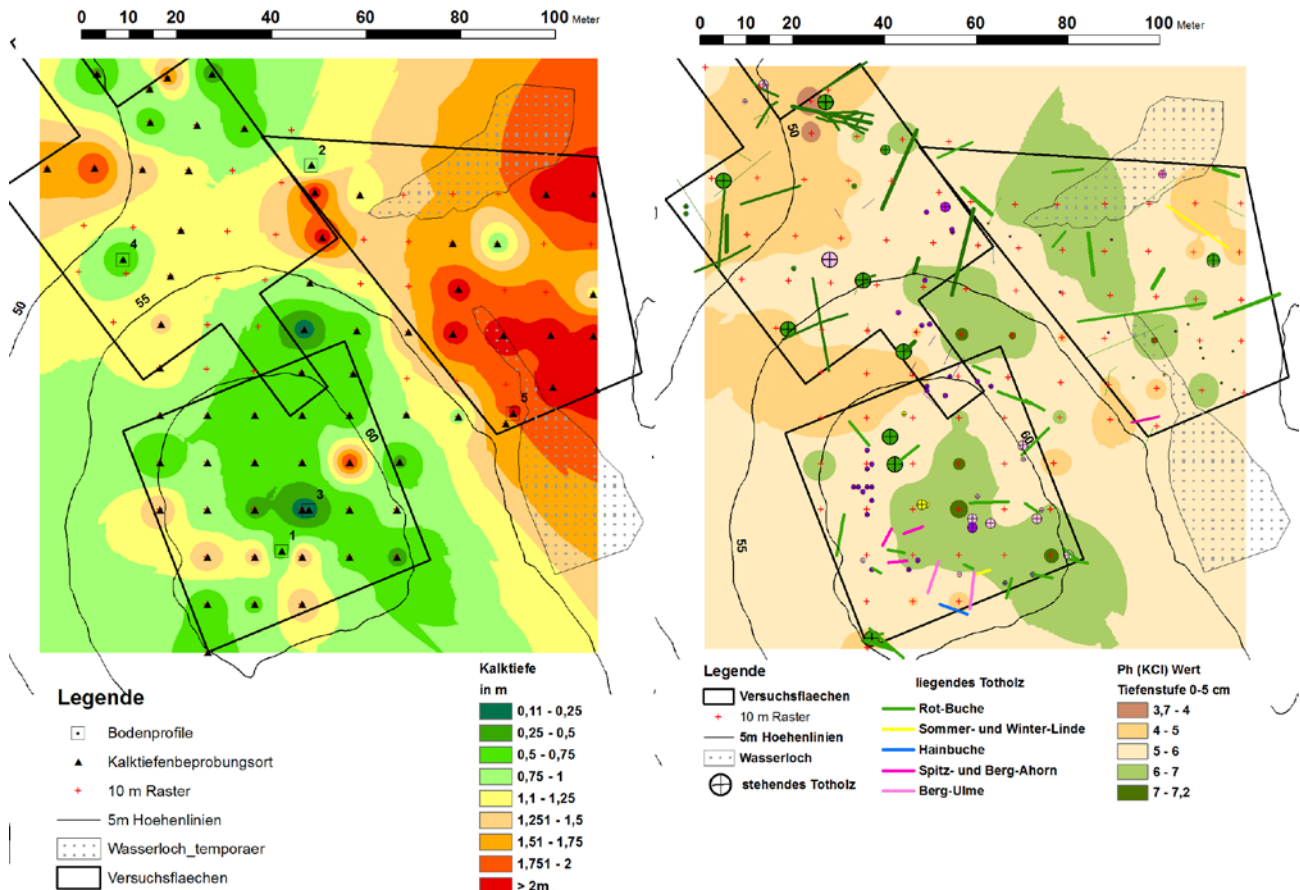


Abb. 4.3-2: Darstellung der ermittelten Kalktiefen (links) mit den im Labor analysierten pH_{KCl} -Werten¹⁵

Trotz der räumlichen Nähe der neutral bis schwach basischen pH_{KCl} Rasteranalyseergebnisse zu dem durch Feldmethoden ermittelten hoch anstehenden Kalk konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Kalktiefe und pH_{KCl} -Wert im Oberboden (Tiefenstufe 0–5 cm) festgestellt werden (Tab. 4.3-5).

¹⁵ Anzumerken ist für die grundwasserbeeinflusste Senkenfläche, dass die hohen pH_{KCl} -Werte des mineralischen Oberbodens nur in einem scheinbaren Widerspruch zu den hier vorgefundenen Kalktiefenstufen stehen. Offensichtlich wird Kalk in wassergelöster Form von der Kuppenfläche hangabwärts und über das im Winterhalbjahr aufsteigende Grund- und Stauwasser horizontal in der Fläche transportiert.

Tab. 4.3-5: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach *Pearson*

Wert		pH _{KCl}	Kalktiefe (m)	Neigung (Grad)	Z (m)	Exposition (Sinus)
pH _{KCl}	Korrelation (Pearson)	1	- 0,08	0,15	-0,22*	-0,29**
	Signifikanz		0,43	0,14	0,03	0,004
Kalktiefe (m)	Korrelation (Pearson)	0,08	1	- 0,37**	- 0,46**	- 0,12
	Signifikanz	0,43		0,000	0,000	0,25
Neigung (Grad)	Korrelation (Pearson)	0,15	- 0,37**	1	0,04	0,08
	Signifikanz	0,14	0,000		0,71	0,47
Höhenwert Z (m)	Korrelation (Pearson)	- 0,22*	- 0,46**	0,04	1	0,36**
	Signifikanz	0,03	0,000	0,71		0,000
Exposition (Sinus)	Korrelation (Pearson)	- 0,29**	- 0,12	0,08	0,36**	1
	Signifikanz	0,004	0,25	0,47	0,000	

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (zweiseitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (zweiseitig) signifikant.

Offensichtlich besteht ein Kausalzusammenhang zwischen dem bodenanalytisch ermittelten pH_{KCl}-Wert, dem Geländehöhenwert (Z) und der Exposition und damit indirekt auch zur Kalktiefe, da die am höchsten anstehenden Kalkareale sich im Zentrum und am Nordhang der *Kuppe* befinden und sich von hier aus nach Norden und Süden hangabwärts ausbreiten (Abb. 4.3-2, links). Gleiches trifft auch für die Areale mit den höchsten pH_{KCl}-Werten zu (Abb. 4.3-2, rechts). Die untersuchten Einflussfaktoren reichen aber nicht aus, um den offensichtlich (wenn auch statistisch nicht signifikant) bestehenden Zusammenhang zwischen der mittels Feldmethoden festgestellten Kalktiefe und dem entsprechenden pH_{KCl}-Wert nachzuweisen. Weitere Einflussfaktoren, wie der laterale Stofftransport von kalkhaltigem Material durch die Bodenfauna und Oberflächenwasser (im Winterhalbjahr im feuchtigkeitsgesättigten Boden über der vorhandenen Stauschicht des Tiefelehmkörpers), der differenzierte Basenpumpeffekt der Baumarten, die möglicherweise vorhandene Versauerungstendenz durch freigesetzte Huminsäuren im Prozess der Totholzmineralisierung sowie der Stoffeintrag durch das Wild sind in diesem Beziehungsgefüge wirksam und konnten hier nicht untersucht werden.

4.3.3 Zuordnung der bodenkundlichen Ergebnisse zu den festgestellten Waldökosystemtypen

Die Zuordnung der bodenkundlichen Ergebnisse der 10 m x 10 m Rasterbeprobung zu den in den drei Untersuchungsflächen festgestellten Waldökosystemtypen (Abb. 4.2-37) ist mittels des Werkzeugs *Verschneiden* im Geografischen Informationssystem durchgeführt worden. Durch die einfaktorielle Varianzanalyse konnte bei bestehender Homogenität der Varianzen (Tab. 4.3-7) ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Waldökosystemtyp und dem pH_{KCl}-Wert sowie der Kalktiefe festgestellt werden (Tab. 4.3-6 und Abb. 4.3-3). Ein schwacher Kausalzusammenhang scheint mit $P = 0,067$ auch zwischen dem Waldökosystemtyp und dem Gesamtkohlenstoff zu bestehen.

Tab. 4.3-6: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der bodenchemischen Untersuchungen des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm) und der Kalktiefe

Wert		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
pH _{KCl}	zwischen den Gruppen	4,998	2	2,499	3,81	0,026
Gesamtstickstoff (%)	zwischen den Gruppen	,017	2	0,008	5,09	0,008
Gesamtkohlenstoff (%)	zwischen den Gruppen	3,104	2	1,552	2,79	0,067
N _{org} in % von C _{org}	zwischen den Gruppen	,306	2	0,153	0,53	0,589
C/N-Verhältnis	zwischen den Gruppen	,883	2	0,441	0,34	0,713
Kalktiefe (m)	zwischen den Gruppen	12,13	2	6,07	37,4	0,000

Die Homogenität der Varianzen ist bis auf den Gesamtstickstoffwert gewährleistet (Tab. 4.3- 7).

Tab. 4.3-7: Ergebnisse des Tests der Homogenität der Varianzen (bei alpha > 0,05 ist Signifikanz – und damit Homogenität – gegeben).

Wert	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
pH _{KCl}	0,905	2	89	0,41
Gesamtstickstoff (%)	4,860	2	89	0,01
Gesamtkohlenstoff (%)	2,995	2	89	0,55
Kalktiefe (m)	0,73	2	89	0,49

Aufgrund der Inhomogenität der Varianzen wurden die Unterschiede im Gesamtstickstoff in der Tiefenstufe (0–5 cm) zwischen den drei Waldökosystemen mittels des nichtparametrischen Kruskal Wallis Tests ergänzend auf Signifikanz geprüft. Die Ausstattung im Gesamtstickstoff des Oberbodens in der Tiefenstufe (0–5 cm) der drei Waldökosysteme zeigt mit mittleren Rängen von 32, 44 und 53 eine unterschiedliche zentrale Tendenz auf (Tab. 4.3-8).

Tab. 4.3-8: Ergebnisse der Tabelle Rang

Wert	Waldökosystem	Probenzahl	Mittlerer Rang
Gesamtstickstoff (%)	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i>	52	53,43
	<i>Bingelkraut-Buchen</i>	9	31,78
	<i>Eschen-Buchen</i>	34	43,99

Die Statistik für den Kruskal-Wallis-Test mit der Gruppenvariable Waldökosystem ist der Tab. 4.3-9 dargestellt.

Tab. 4.3-9: Kruskal-Wallis-Teststatistik

	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz
Gesamtstickstoff (%)	5,858	2	0,053

Es ist ein Zusammenhang bei $P = 0,053$ zwischen dem Gesamtstickstoffgehalt des Oberbodens in der Tiefenstufe (0–5 cm) und dem Waldökosystemtyp gegeben. Das Signifikanzniveau von $P = 0,05$ wird jedoch knapp verfehlt.

Abb. 4.3-3 zeigt die Ergebnisse der waldökosystembezogenen Varianzanalyse der Oberbodenwerte sowie der ermittelten Kalktiefen.

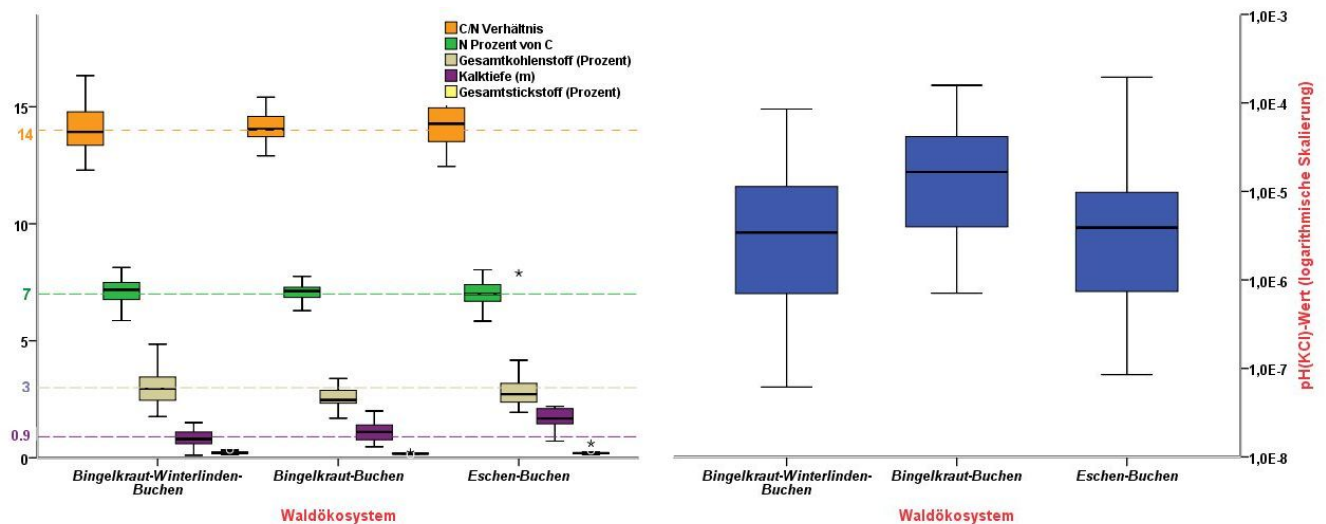


Abb. 4.3-3: Boxplots der Laboranalysen des Oberbodens der Tiefenstufe (0–5 cm) der drei Waldökosysteme mit Darstellung der Kalktiefe, des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff (links) sowie (rechts) des pH_{KCl} -Wertes

Obwohl alle drei Waldökosystemtypen zur Gruppe der Kalk-Buchenwälder gehören (HOFFMANN & POMMER 2013, 354 ff.), unterscheiden sie sich signifikant durch die Tiefe des pflanzenverfügbar anstehenden Kalks und teilweise im pH_{KCl} -Wert (Abb. 4.3-3, Tab. 4.3-10 und 4.3-11). Ursachen für die geringfügigen Unterschiede in den bodenchemischen Werten der Waldökosystemtypen sind neben den festgestellten differenzierten Kalktiefen u. a. in der Zusammensetzung der Bestockung zu suchen. Unterschiedliche Baumartenkombinationen sowie Mengenanteile der einzelnen Mischbaumarten bewirken eine verschiedenartige Zusammensetzung der Laubstreu (unterschiedlicher Nährstoffgehalt und Zersetzungsgeschwindigkeit), die über lateralen und vertikalen Stofftransport (Bioturbation und Basenpumpeffekt) auf den Waldboden zurückwirkt. Der zeitlich versetzt erfolgte Zusammenbruch der alten Waldgeneration auf den einzelnen Flächen kann im Hinblick auf die Dauer der Mineralisierungsprozesse auch eine Ursache der Oberbodenunterschiede darstellen. (Beginnend im Unter-*Hang*, dann in der *Senke* und erst zum Schluss auf der *Kuppe*, siehe Auswertung der Luftbildzeitreihe im Kapitel 4.2.3). Es konnten folgende Mittelwerte der untersuchten bodenchemischen Parameter festgestellt werden (Tab. 4.3-10).

Tab. 4.3-10: Übersicht über die Mittelwerte der bodenchemischen Untersuchungen

Wert	Waldökosystem	N	\bar{X}_0	$S_x \%$	X_{\min}	X_{\max}
pH_{KCl}	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	52	5,61	0,86	4,1	7,2
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	9	4,81	0,75	3,8	6,2
	<i>Eschen-RBU</i>	31	5,40	0,73	3,7	6,7
Gesamtkohlenstoff (%)	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	52	3,06	0,89	1,8	6,1
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	9	2,58	0,55	1,7	3,4
	<i>Eschen-RBU</i>	31	2,74	0,48	1,9	3,8
Gesamtstickstoff (%)	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	52	0,21	0,05	0,13	0,34
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	9	0,18	0,03	0,13	0,23
	<i>Eschen-RBU</i>	31	0,19	0,026	0,14	0,25
N_{org} in % von C_{org}	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	52	7,11	0,59	5,6	8,1
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	9	7,03	0,44	6,3	7,8
	<i>Eschen-RBU</i>	31	6,98	0,47	5,8	7,9
C/N-Verhältnis	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	52	14,17	1,25	12,3	17,8
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	9	14,28	0,92	12,9	15,9
	<i>Eschen-RBU</i>	31	14,38	0,98	12,7	17,1
Kalktiefe (m)	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>		0,87	0,37	0,1	2,0
	<i>Bingelkraut-RBU</i>		1,14	0,51	0,5	2,0
	<i>Eschen-RBU</i>		1,66	0,42	0,7	2,2

Anhand des multiplen Mittelwertvergleichs nach der Scheffé-Prozedur konnten gesicherte Unterschiede

- in den Mittelwerten des pH_{KCl} -Wertes zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Bingelkraut-Buchenwald*
- und in der Kalktiefe zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald* sowie dem *Bingelkraut-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald* herausgearbeitet werden (Tab. 4.3-11).

Im Gesamtkohlenstoffgehalt des Mineralbodens (0–5 cm) bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Waldökosystemen.

Tab. 4.3-11: Multipler Mittelwertvergleich durch paarweise Signifikanzprüfung der Mittelwerte der Analyseergebnisse des Oberbodens zwischen den Waldökosystemen nach der Scheffé-Prozedur (gesicherte Unterschiede fett hervorgehoben)

Abhängige Variable	Waldökosystem	Waldökosystem	P-Wert
pH_{KCl}-Wert	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	<i>Bingelkraut-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,029 0,521
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,029 0,171
	<i>Eschen-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Bingelkraut-RBU</i>	0,521 0,171
Gesamtkohlenstoff (%)	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	<i>Bingelkraut-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,206 0,165
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,206 0,855
	<i>Eschen-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Bingelkraut-RBU</i>	0,165 0,855
Kalktiefe (m)	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i>	<i>Bingelkraut-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,188 0,000
	<i>Bingelkraut-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Eschen-RBU</i>	0,188 0,004
	<i>Eschen-RBU</i>	<i>Bingelkraut-WLI-RBU</i> <i>Bingelkraut-RBU</i>	0,000 0,004

Der räumliche Zusammenhang zwischen etablierten Waldökosystem in den Grenzen der drei Untersuchungsflächen, inklusive Baumartenkombination, C/N-Verhältnis und prozentualem Gesamtstickstoffanteil am Gesamtkohlenstoffanteil ist Abb. 4.3-4 zu entnehmen.

Kurze Zusammenfassung

- Die bodenchemischen Analysewerte der Tiefenstufe 0–5 cm entsprechen den typischen Eigenschaften einer Bodenbildung (Fahlerde, Parabraunerde, Tieflehm-Fahlerde, Staugley-Fahlerde) aus Geschiebemergel mit dem Humuszustand Mull.
- Zwischen den drei kartierten soziologischen Artengruppenkombinationen gibt es geringe (nicht signifikante) Unterschiede in den pH_{KCl} -, C/N -, N_{Gesamt} -, C_{Gesamt} - und N_{Org} in Prozent von C_{Org} -Werten der Tiefenstufe (0–5 cm).
- Es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen der Kalktiefe und dem pH_{KCl} -Wert (Tiefenstufe 0–5 cm).
- Ein signifikanter Unterschied im pH_{KCl} -Wert (Tiefenstufe 0–5 cm) und der Kalktiefe ist zwischen den drei Waldökosystemtypen festzustellen, obwohl alle drei zur Gruppe der Kalk-Buchenwälder gehören.
- Unterschiede zwischen den Waldökosystemen sind auch im N_{Gesamt} -Wert der Tiefenstufe (0–5 cm) gegeben, das Signifikanzniveau wird mit 0,053 knapp verfehlt.



Abb. 4.3-4: Gegenüberstellung der sich herausgebildeten Waldökosystemtypen (HOFMANN & POMMER 2013) mit der Darstellung der räumlichen Verteilung des für die Tiefenstufe 0–5 cm ermittelten prozentualen Anteils des organischen Stickstoffs am Gesamtkohlenstoff (Mitte) und des C/N-Verhältnisses (rechts)

4.4. Untersuchungsergebnisse am liegenden Totholz

Die Rekonstruktion der Stammfußkoordinaten des lebenden Bestandes der Erstinventuren (sowie Durchmesser- und Höhenwerte aus den Originalklupplisten) und deren Lageidentifizierung als liegendes Totholz in der Wiederholungsinventur 2012 boten die Möglichkeit, für zehn auf den drei Untersuchungsflächen ausgewählte Altbuchen Nährstoffbilanzierungen für Kohlenstoff und Stickstoff anzustellen. Dies wurde durch den Vergleich des lebenden Derbholzvolumens in der Erstinventur mit dem in der Wiederholungsinventur durchgeführt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Totholzmineralisierung von Kohlenstoff und Stickstoff auf den Oberboden (Tiefenstufe 0–5 cm) untersucht. Die bisher 12-jährige Beobachtung der Untersuchungsflächen zeigt, dass der Totholzabbau eines einzelnen Stammes auf den stickstoffreichen, kalkhaltigen Standorten im *Faulen Ort* in zeitlich kurzen Zeiträumen verlief (Abb. 4.4-1).



Abb. 4.4-1: Im Abstand von 10 Jahren fotografierte liegende Reste der Rot-Buche Nr. 50 am *Hang*, links April 2004, RÜFFER (2007, 67 ff.), (Länge ca. 11,9 m; Volumen: 2,4 m³); rechte Bildhälfte Mulmrest mit verbliebenden 11 cm Auflage, aufgenommen 12/2014

4.4.1 Einzelbaumweise Bilanzierung der Makroelemente Kohlenstoff und Stickstoff

Zum quantitativen Verständnis der bei der Zersetzung von Rot-Buchen freigesetzten Kohlenstoff- und Stickstoffmenge wurden zunächst die oberirdische Trockenmasse, die Stammtrockenmasse mit Rinde sowie der jeweilige Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt einzelbaumweise für jede der zehn zum Zeitpunkt der Erstinventuren lebenden Rot-Buchen berechnet (KRAUß & HEINS DORF 2008; Tab. 4.4-1). Zum besseren Verständnis sind die einzelbaumweisen Derbholz- und Schaftholzvolumina, berechnet im Field-Map aus den

Durchmesser- und Höhenwerten (LOCKOW, zit. nach DEGENHARDT, 2001), als Zusatzinformation angegeben.

Tab. 4.4-1: Trockenmassen und Elementvorräte der zehn ausgesuchten Buchen zum Zeitpunkt der Erstinventur (einzelbaumweise Berechnung nach KRAUß & HEINSDORF 2008)

RBU Nr.	VD [m ³]	VS [m ³]	Oberirdische Trockenmasse (TM Dendro gesamt) [kg]	C [kg] in TM Dendro	N [kg] in TM Dendro	Stamm-trocken-masse mit Rinde (STM m. R) [kg].	C [kg] STM m. R.	N [kg] STM m. R.
8	7,3	5,04	4067,17	1887,45	5,37	3425,95	1571,6	3,28
24	7,9	5,39	4621,84	2144,28	6,48	3677,57	1680,4	3,53
28	10,2	6,62	5883,88	2726,95	8,29	4547,69	2071,0	4,26
2	28,9	16,06	13741,84	6338,89	15,87	11183,97	5071,8	9,12
50 ¹⁶	1,9	1,1	–	–	–	806,19	349,7	1,21
99	15,6	9,7	3041,97	3651,42	9,49	6629,11	3024,4	5,79
4	9,7	6,47	7894,95	2361,82	6,32	4386,75	2010,9	4,04
5	14,5	9,08	5096,01	3525,01	9,51	6248,68	2848,2	5,53
10	15,9	9,75	7619,01	3915,47	10,78	6764,93	3076,9	5,95
34	6,3	4,39	8466,06	1647,55	4,84	2963,80	1360,5	2,91

Die ermittelten einzelbaumbezogenen Werte in den Spalten *C (kg) bzw. N (kg) in TM Dendro* stellen die modellhaft angenommenen gespeicherten Kohlenstoff- sowie Stickstoffvorräte der oberirdischen Dendromasse als Ausgangsbilanz dar, wohl wissend, dass die einzelnen Bäume bis zu ihrem Absterben (dessen Zeitpunkt nicht exakt bekannt ist) infolge des Zuwachses weitere Nährstoffe zu akkumulieren vermochten. Von den in der Wiederholungsinventur 2012 identifizierten liegenden Rot-Buchen konnte das Volumen der Reste der Totholzstämme berechnet und in Beziehung zu den jeweiligen Schaftausgangsvolumina, Spalte (VS[m³]) der Tab. 4.4-1, gesetzt und die noch im Totholz gebundene Nährstoffmenge an Kohlenstoff und Stickstoff berechnet werden. Die Feststellung der baumspezifisch im Zuge der Totholzzersetzung mineralisierten Kohlenstoff- und Stickstoffmenge erfolgte abschließend über die Subtraktion der noch im Totholz gebundenen Restnährstoffe (Spalte *C [kg] und N [kg] noch gebunden*) der Tab. 4.4-1 von der baumspezifischen Ausgangsnährstoffmenge, Spalten *C (kg) bzw. N (kg) in TM Dendro* der Tab. 4.4-1. Im Falle der Rot-Buche Nummer 2 lagen zwei Stammstücke vor, die jeweils einzeln (2 a und 2 b) vermessen, deren Stoffbilanzen jedoch gemeinsam angegeben wurden. Die im Rahmen des Totholzabbaus freigesetzten Makroelementmengen variieren dimensions- und situationsbedingt beim Stickstoff zwischen 2,3 kg (Minimum) und 15,7 kg (Maximum) und beim Kohlenstoff zwischen 372,7 kg und 6,275 t je Baum (Tab. 4.4-2).

¹⁶ Buche Nummer 50 hatte nach den Bestandesaufrisszeichnung von MANSIK (1971) nur noch einen lebenden Starkast und bei einem Durchmesser von 79 cm nur eine Baumhöhe von ca. 7 m. Deshalb wird für diesen Baum als Bezug nur die Stamm-trocken-masse mit Rinde gewählt.

Vergleichsweise geringe Restmengen mit 0,2 kg bis 4,0 kg beim Stickstoff und 31,6 kg bis 1,99 t beim Kohlenstoff sind gegenwärtig noch in den Totholzresten gebunden. Hochgerechnet sind in den letzten vier Jahrzehnten durch das bis 2012 erfolgte Absterben und die nachfolgende Zersetzung der dort im Jahre 1958 bzw. 1968 vorhandenen Altbäumen mit dem einzelbaumweise geschätzten oberirdischen Vorrat (anhand der Durchmesser- und Höhenwerte der Erstinventuren¹⁷) insgesamt

- 141 t Kohlenstoff und 446 kg Stickstoff je Hektar auf der *Kuppe*,
- 59 t Kohlenstoff und 204 kg Stickstoff je Hektar am *Hang*, sowie
- 220 t Kohlenstoff und 669 kg Stickstoff je Hektar in der *Senke* freigesetzt worden.

Tab. 4.4-2: Einzelbaumbezogener Kohlenstoff- und Stickstoffabbau im Zuge der Totholz-mineralisierung sowie deren Restvorräte

Baum Nr.	Fläche	Volumen [Raummeter]	C [kg] mineralisiert	C [kg] noch gebunden	N [kg] mineralisiert	N [kg] noch gebunden
8	<i>Kuppe</i>	0,5	1731,54	155,91	5,05	0,33
24	<i>Kuppe</i>	0,5	1988,39	155,88	6,15	0,33
28	<i>Kuppe</i>	0,3	2633,10	93,85	8,09	0,19
2a	<i>Hang</i>	0,1	6275,73	31,58	15,76	0,06
2b	<i>Hang</i>	0,1		31,58		0,06
50	<i>Hang</i>	0,4		127,15		0,44
99	<i>Hang</i>	2,4	2903,13	748,29	8,06	1,43
4	<i>Senke</i>	6,4	372,69	1989,13	2,32	4,00
5	<i>Senke</i>	2,1	2866,28	658,73	8,23	1,28
10	<i>Senke</i>	0,8	3663,01	252,46	10,30	0,49
34	<i>Senke</i>	0,9	1368,63	278,92	4,24	0,60

4.4.2 Auswirkungen der flächigen Kohlenstoff- und Stickstofffreisetzungen auf den Oberboden (Tiefenstufe 0–5 cm) der drei Untersuchungsflächen

Welche Auswirkungen hatten diese gewaltigen Makroelementfreisetzungen? Flächige Daten über die Kohlenstoff- und Stickstoffausstattung der Tiefenstufe 0–5 cm liegen von den Erstinventuren, die zu bzw. vor Beginn der Zerfallsphase stattfanden, nicht vor. Es sollen deshalb die im Jahre 1968 punktuell in der Tiefenstufe 0–5 cm zweier Bodenprofile ermittelten Kohlenstoff- und Stickstoffwerte der Bodenproben Mansik's als Vergleich herangezogen werden (MANSIK 1971, 39 ff.). Die beiden alten Bodenprofile befinden sich im Norden der *Senke* und Südhälfte der *Kuppe* (Abb. 3.2-2 und Abb.4.1-1 mit Profil 1 und 2). Sie wurden im Jahre 2003 anhand der Lage, begünstigt durch den Lageplan und der im Gelände vorhandenen Geländevertiefung, identifiziert und in gleicher Methodik am 20.10.2005 beprobt (SEDLACZEK 2006, 51 f.). Die Werte sind in der Tab. 4.4-3 gegenübergestellt.

¹⁷ Bei der Annahme, dass die Kohlenstoff- und Stickstoffausstattung der oberirdischen Dendromasse der je Fläche geringen Mischbaumartenzahl (der Trauben-Eiche, des Spitz-Ahorns, der Winter-Linde und der Hainbuche) dem der Buche entspricht.

Tab. 4.4-3: Gegenüberstellung der Stickstoff- und Kohlenstoffanteile des Oberbodens (verändert nach SEDLACZEK 2006, 51)

	Profil Senke Tiefenstufe 0–5cm			Profil Kuppe Tiefenstufe 0–5cm		
Jahr	N (%)	C (%)	C/N-Verhältnis	N (%)	C (%)	C/N-Verhältnis
1968	0,145	2,4	14,1	0,228	3,2	16,6
2004	0,224	2,8	14,4	0,292	4,2	12,3

Obwohl diese punktuellen Beprobungen keinen Anspruch auf Flächenrepräsentativität erfüllen können, zeigen sie zum einen den leichten Anstieg sowohl der Stickstoff- als auch der Kohlenstoffwerte in beiden Bodenprofilen. Die Kohlenstoff- und Stickstoffwerte des Profils *Kuppe* weisen im Vergleich höhere Ausgangswerte auf. Während das C/N-Verhältnis in Übereinstimmung mit den Stammeigenschaften des Bodens und im Einklang mit der Bestockung und Vegetationsausstattung in der *Senke* konstant blieb (SEDLACZEK 2006, 51), verbesserte es sich im Bodenprofil der *Kuppe* um eine ganze Stufe von *mäßig eng bis mittel* hin zu *eng bis mäßig eng* (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, 176). Es korrespondiert ca. 12 m von der Rendzina mit Kalk in 0,15 m Tiefe entfernt mit dem Stammstandortspotential sowie dem Vegetations- und Bestockungszustand des Bingelkraut-Winterlinden-Buchenökosystems. Auffallend im Vegetationsbild ist die zeitweilige Etablierung des Großstrauchs Schwarzer Holunder und nachfolgend der Berg-Ulme, ein Nitratzeiger aus dem Nordbuchenwald und Bergland, in der Nähe von stark zersetzten Buchenresten (Abb. 4.2-8 und beispielhaft Abb. 4.4-2).



Abb. 4.4-2: Reste (Vordergrund) und dahinter Verjüngung des Schwarzen Holunders auf den (fast vollständig) mineralisierten Resten der Rot-Buchen Nr. 1–3 im Südosten der *Kuppe* im Hintergrund Hainbuche Nummer 5 und durch Stockausschlag verjüngte alte Winter-Linde Nummer 6 (12/2014)

4.4.3. Aktuelle kleinräumliche Auswirkungen der einzelbaumbezogenen Kohlenstoff- und Stickstofffreisetzung auf den Oberboden

Zur Beantwortung der Frage, inwiefern die Totholzzersetzung in der Zerfallsphase mit der Freisetzung erheblicher Mengen an Kohlenstoff und Stickstoff den Oberboden beeinflusst, sind im Dezember 2013 elf Totholzreste von ehemals zehn Buchen mit jeweils drei Wiederholungen je Auflage beprobt worden, um die Ausgangsmengen zu erfassen (Tab. 4.4-4 und Abb. 4.4-3).

Tab. 4.4-4: Deskriptive Statistik Analysenergebnisse der Auflagen (Totholzreste)

	N	X _{min}	X _{max}	Ø	S _x %
Auflagenhöhe (cm)	33	4	55	18	12
Durchmesser (cm)	33	30	120	80,7	26,6
Gesamtkohlenstoff (%)	33	27,96	55,91	46,76	7,8
Gesamtstickstoff (%)	33	0,85	1,85	1,28	0,24
C/N-Verhältnis	33	23,63	64,38	37,83	10,33
N _{org} in % von C _{org}	33	1,55	4,23	2,83	0,75
Glühverlust	33	48,22	96,93	82,73	13,44

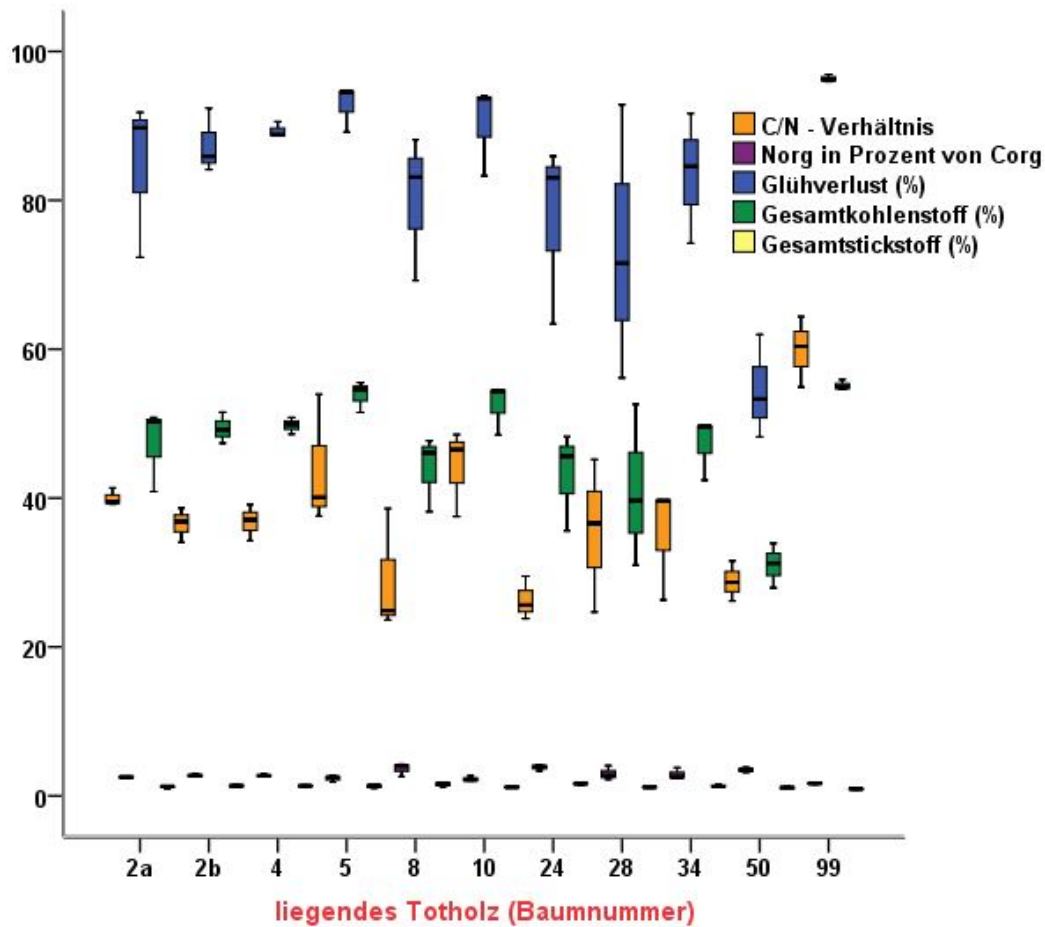


Abb. 4.4-3: Boxplots der Analysewerte der Totholzauflage mit Darstellung des Glühverlustes, des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff

Die einzelnen Analysewerte der Auflagen variieren untereinander recht stark – der baumartspezifische prozentuale Gesamtkohlenstoffgehalt und Glühverlust um den Faktor 2, der prozentuale Gesamtstickstoffanteil um deutlich mehr als 2 und schließlich der Anteil des organischen Stickstoffs am Gesamtkohlenstoff sogar um den Faktor 3 (Abb. 4.4-3). Ursache dürfte hierfür der unterschiedliche Grad der bereits stattgefundenen Holzzersetzung der einzelnen liegenden toten Buchen sein, die sich beispielsweise bei der Buche Nr. 50 (Abb. 4.4-1) der vollständigen Mineralisierung der Totholzauflage näherte. In der Totholzauflage sind mit den Medianwerten der organischen Substanz von ca. 90 %, den Medianwerten des Gesamtkohlenstoffs von etwa 50 % und den Medianwerten des C/N-Verhältnisses um die 38 % erwartungsgemäß sehr deutlich höhere Werte im Vergleich zum Mineralboden der Tiefenstufe (0–5 cm) *unmittelbar unter* sowie *neben den Totholzresten* beobachtet worden (Abb. 4.4-4). Die Medianwerte des prozentualen organischen Gesamtstickstoffanteils am organischen Gesamtkohlenstoffanteil der Auflagen erreichen hingegen in etwa nur die Hälfte der im Mineralboden der Tiefenstufe (0–5 cm) vorhandenen.

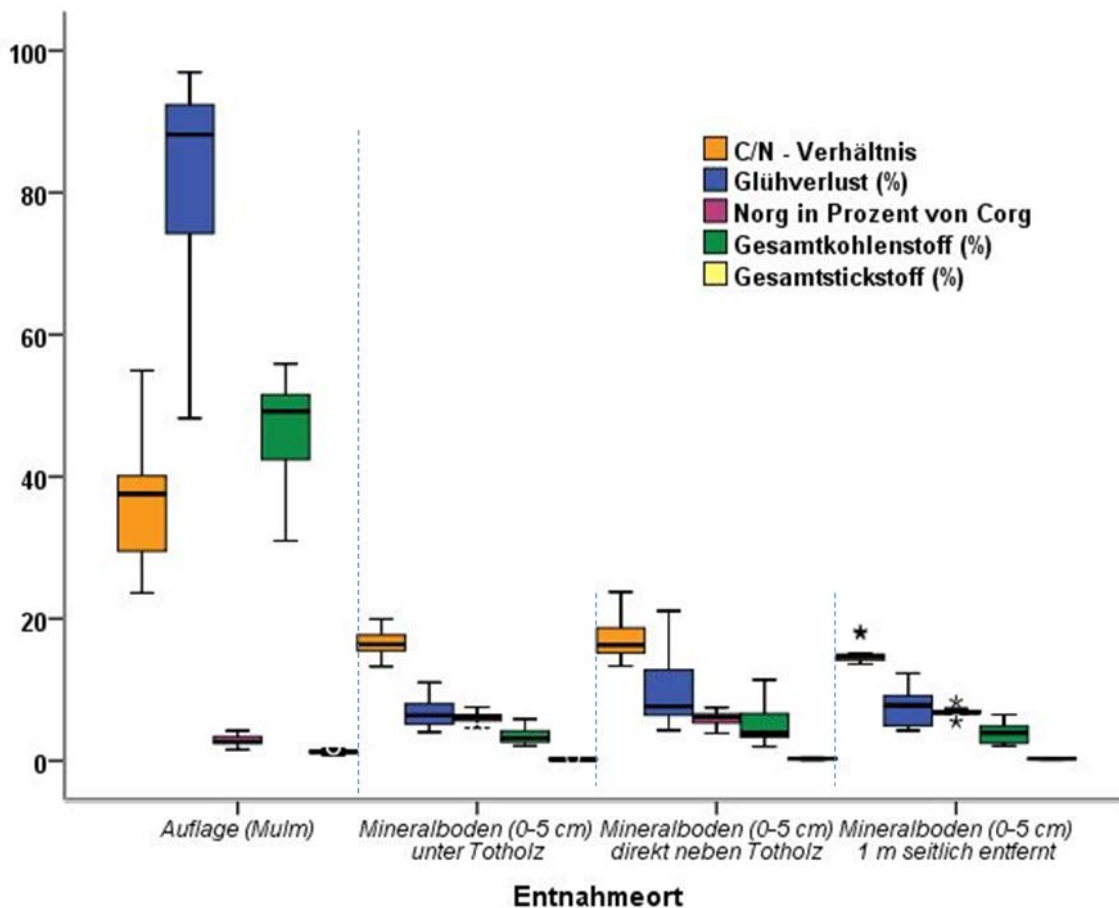


Abb. 4.4-4: Boxplots mit den Analysewerten aus der Auflage, des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm) – *unmittelbar unter* dem Totholz, *unmittelbar seitlich angrenzend* sowie der Kontrollstichprobe in *1 m seitlicher Entfernung* vom Totholztorso mit Darstellung des Glühverlustes, des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff

Ein ausschließlicher Vergleich der Werte des Mineralbodens in der Tiefenstufe (0–5 cm) direkt *unter* der Auflage, im *seitlichen Grenzbereich* der Auflage sowie in *1 m Abstand* zeigt Abb. 4.4-5. Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik sind in Tab. 4.4-5 enthalten.

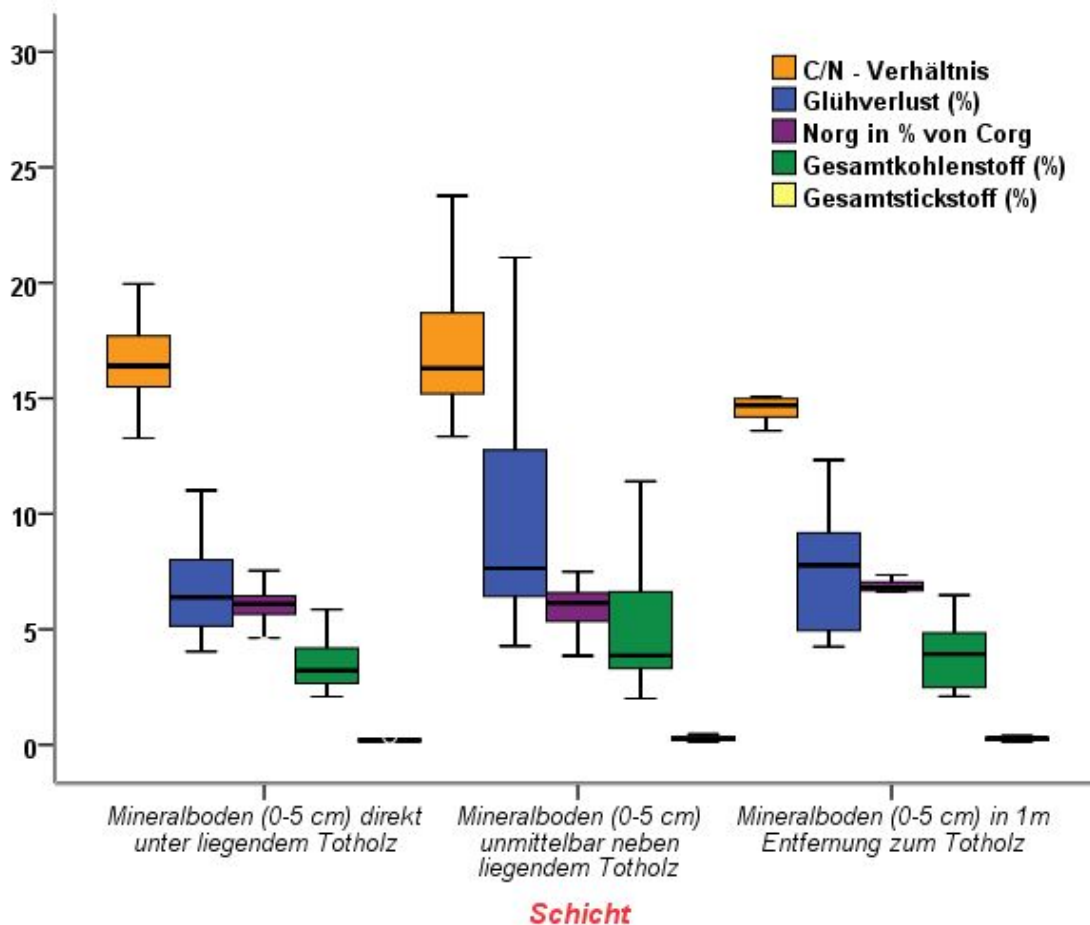


Abb. 4.4-5: Boxplots der Analysewerte des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm) – *unmittelbar unter* dem Totholz (links), *unmittelbar seitlich angrenzend* (Mitte) sowie der Kontrollstichprobe in *1 m seitlicher Entfernung* vom Totholztorso (rechts) mit Darstellung des Glühverlustes, des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff

Auffallend ist erstens der im Vergleich zum Mineralboden *direkt unter* und *in 1 m Entfernung vom Totholzrest* deutlich höhere Quantilabstand bzw. die größere Standardabweichung (Tab. 4.4-5) sämtlicher Analysewerte *unmittelbar neben dem liegenden Totholz*. Die Ursache dürfte in der Tatsache begründet sein, dass es sich bei den Totholzresten auf den terrestrischen Standorten der *Kuppe* und des *Hangs* überwiegend um die Erdstammstücke handelte, die nach Abbruch der Krone und des oberen Stammabschnitts zeitlich verzögert als letzte in Kontakt mit dem Oberboden kommen (Abb. 4.4-6, links und rechts) und von KAHN (2008) hinsichtlich der Todesart als *dichteabhängige Mortalität* (KAHN 2008, 11) bezeichnet wurden. In den beiden Bildhälften der Abb. 4.4-6 ist dieser Prozess als *unechte Zeitreihe* abgebildet: Stammfäule am Stamm (infolge der Prozesskette plötzliche Freistellung, Sonnenbrand, Pilzinfektion, Fäulnis) erwirkt mechanische Instabilität (Abb. 4.4-

6, links im Hintergrund). Infolge von Sturmereignissen kommt es zum Abbruch des Stammoberteils, dem sogenannten *Sprödbbruch* (KAHL 2008, 11; Abb. 4.4-6, links im Vordergrund). Dabei liegen die zuvor abgebrochenen Totholzreste unregelmäßig verteilt auf dem Erdboden. Zeitlich unterschiedlich verzögert (ein Austrieb von Ästen mit dem Versuch der Bildung einer Sekundärkrone ist möglich) kommt es schließlich zum Wurf des Erdstammstücks, verursacht durch *dichteabhängige Mortalität* und nachfolgend zu seiner Zersetzung (Abb. 4.4-6, rechts). Je nach der späteren Fallrichtung des Erdstammstücks trifft es auf einen bisher nicht vom Totholz kontaktierten Oberboden oder aber es fällt auf dieselbe Stelle und es kommt zu einem erneuten Eintrag von Kohlenstoff und Nährstoffen.



Abb. 4.4-6: links: Im Hintergrund (fast) 400-jährige Buche Nummer 20 mit sichtbaren Fäulnisstellen im unteren Drittel des Schaftholzes – der wahrscheinlich zukünftigen (*Spröd*)-Bruchstelle, im Vordergrund: stehendes Erdstammstück Buche Nummer 19 im Südwesten der Kuppe; rechte Bildhälfte: liegendes Erdstammstückrest von Buche 24 (12/2014)

So erklären sich die höheren Maximal-, Mittel- und Medianwerte für Kohlenstoff und Stickstoff im Oberboden (Tiefenstufe 0–5 cm) *unmittelbar neben* dem Totholzrest und die vergleichsweise geringeren Werte *direkt unter* dem Torso. In der Wiederholungsinventur 2012 konnten zu 63 % Totholzreste bis 7,5 m Länge, weiteren 21 % bis 15 m Länge und nur in 16 % Totholz von 15 m bis 30 m festgestellt werden (Abb. 4.4-7). 15,0 m bis 30,0 m Totholzreste, entstanden durch den Wurf des Baumes mit Wurzelteller, wurden nur in der *Senke* und am Mittel- sowie Unter-*Hang* beobachtet.

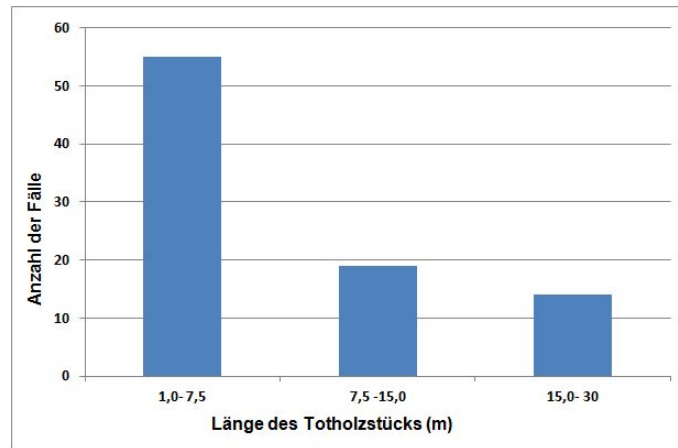


Abb. 4.4-7: Übersicht über die gemessenen Totholzlängen der Wiederholungsinventur

Tab. 4.4-5: Deskriptive Statistik der Oberbodenwerte (Tiefenstufe 0–5 cm) *unter*, *neben* und *in 1 m Entfernung* von der Totholzauflage und des als Vergleich herangezogenen 10 m x 10 m Rasters¹⁸

Wert	Position zum Totholz	X _{min}	X _{max}	Ø	S _x %
Gesamtkohlenstoff (%)	<i>unter</i>	2,09	7,35	3,46	1,119
	<i>Seitlich angrenzend</i>	2,00	11,40	4,80	2,215
	<i>1 m Entfernung</i>	2,10	6,48	3,87	1,503
	<i>10 m x 10 m Raster</i>	1,69	7,89	2,98	0,914
Gesamtstickstoff (%)	<i>unter</i>	0,13	0,342	0,20	0,046
	<i>Seitlich angrenzend</i>	0,115	0,462	0,27	0,089
	<i>1 m Entfernung</i>	0,141	0,385	0,26	0,080
	<i>10 m x 10 m Raster</i>	0,126	0,611	0,21	0,06
C/N-Verhältnis	<i>unter</i>	13,27	23,40	17,00	2,70
	<i>Seitlich angrenzend</i>	13,35	25,97	17,25	3,05
	<i>1 m Entfernung</i>	12,06	18,20	14,92	1,75
	<i>10 m x 10 m Raster</i>	12,29	17,84	14,21	1,14
N_{org} in % von C_{org}	<i>unter</i>	4,27	7,53	6,03	0,872
	<i>Seitlich angrenzend</i>	3,85	7,49	5,96	0,960
	<i>1 m Entfernung</i>	5,49	8,29	6,78	0,766
	<i>10 m x 10 m Raster</i>	5,60	8,14	7,08	0,539
Glühverlust (prozentualer Anteil organischen Materials)	<i>unter</i>	4,0	14,1	6,4	6,7
	<i>neben</i>	4,3	21,1	7,6	9,2
	<i>1 m entfernt</i>	4,2	12,3	7,8	7,5

Auffallend sind die vergleichsweise erhöhten Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffwerte für den Oberboden (0–5 cm) in *1 m Entfernung* vom Totholzstück im Vergleich zum 10 m Raster. Sie spiegeln sich auch in einem erhöhte biologische Aktivität signalisierenden, vergleichsweise engen C/N-Wert (14,9) und einem vergleichsweise hohen prozentualen

¹⁸ Der prozentuale Anteil organischen Materials, ermittelt durch den *Glühverlust*, wurde für die bodenkundlichen Untersuchungen an den 95 Rasterpunkten nicht bestimmt.

Anteil des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoffwert (6,8) für den Beprobungsort *1 m Entfernung* vom Totholzstück wider (Tab. 4.4-5). Eine einfaktorielle Varianzanalyse der Mittelwerte, bei bestehender Homogenität der Varianzen (Tab. 4.4-6), bestätigte einen signifikanten Unterschied in den Mittelwerten des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff in der Tiefenstufe (0–5 cm) zwischen den drei Entnahmeorten (Tab. 4.4-5). Für das C/N-Verhältnis besteht mit ($P = 0,052$) ein Unterschied, das Signifikanzniveau wird jedoch knapp verfehlt.

Tab. 4.4-6: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der bodenchemischen Untersuchungen des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm)

Wert		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
C/N-Verhältnis	zwischen den Gruppen	46,631	2	23,315	3,07	0,052
N _{org} in % von C _{org}	zwischen den Gruppen	5,988	2	2,994	3,71	0,029

Tab. 4.4-7: Ergebnisse des Test der Homogenität der Varianzen (bei alpha > 0,05 Signifikanz – und damit Homogenität – gegeben)

Wert	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
C/N-Verhältnis	2,345	2	74	0,103
N _{org} in % von C _{org}	1,509	2	74	0,228

Aufgrund der Inhomogenität der Varianzen für die übrigen Untersuchungsergebnisse erfolgte eine zusätzliche Signifikanzprüfung mit dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test für alle untersuchten Parameter unter Einbeziehung der 95 Einzelwerte des 10 m x 10 m Rasters (Tiefenstufe 0–5 cm) (Tab. 4.4-8).

Tab. 4.4-8: Gemittelte Ränge und Gruppengrößen der untersuchten Bodenparameter

Wert	Beprobungsort	Anzahl	Mittlerer Rang
Gesamtkohlenstoff (%)	unter	33	93,45
	neben	33	122,26
	1 m entfernt	11	100,77
	10 m x 10 m Raster	95	70,01
Gesamtstickstoff (%)	unter	33	73,06
	neben	33	117,58
	1 m entfernt	11	109,23
	10 m x 10 m Raster	95	77,74
C/N-Verhältnis	unter	33	121,73
	neben	33	122,15
	1 m entfernt	11	84,55
	10 m x 10 m Raster	95	62,11
N_{org} in % von C_{org}	unter	33	51,27
	neben	33	50,85
	1 m entfernt	11	88,45
	10 m x 10 m Raster	95	110,89
Glühverlust (prozentualer Anteil organischen Materials)	unter	33	32,0
	neben	33	46,61
	1 m entfernt	11	37,18

Unterschiede in den zentralen Tendenzen sind bei allen Analyseergebnissen im Oberboden der Tiefenstufe (0–5 cm) an den vier Beprobungsorten *unter* dem Totholz, *direkt* neben dem Totholz, *in 1 m Entfernung* vom Totholz sowie den 95 Punkten des *10 m x 10 m Rasters* vorhanden.

Tabelle 4.4-9 Statistik für den Kruskal-Wallis-Test

Wert	C _{Gesamt}	N _{Gesamt}	C/N-Verhältnis	N _{org} in % von C _{org}	Glühverlust
Chi-Quadrat	28,982	20,488	56,246	56,246	7,118
df	3	3	3	3	2
Asymptotische Signifikanz	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Die beobachteten Unterschiede in den zentralen Tendenzen der einzelnen Bodenparameter zwischen den vier Beprobungsorten sind hochsignifikant. Da es in den mittleren Rängen der Bodenanalyseergebnisse zwischen einzelnen Entnahmeorten auch Ähnlichkeiten gibt (Abb. 4.4-8 und Tab. 4.4-8), sollen diese mittels eines Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni-Test) paarweise miteinander verglichen werden, um zu prüfen, welche der vier Gruppen sich hinsichtlich welcher Bodenparameter signifikant voneinander unterscheiden (Tab.4.4-10).

Tab. 4.4-10: Ergebnisse des Dunn-Bonferroni-Tests (paarweise Prüfung)

Wert	Entnahmeort	Position zum Totholz (Entnahmeort 2)	Test-statistik	S _x %	Std. Test-statistik	P-Wert	Asymptotische Signifikanz
C/N-Verhältnis	<i>unter</i>	<i>unmittelbar neben</i>	-0,424	12,26	-0,35	0,97	1,0
	<i>1 m neben</i>	<i>unter</i>	37,182	17,34	2,15	0,032	0,192
		<i>unmittelbar neben</i>	37,6	17,34	2,17	0,03	0,18
	<i>10m x 10m Raster</i>	<i>unter</i>	59,62	10,06	5,93	0,000	0,000
		<i>unmittelbar neben</i>	60,05	10,06	5,97	0,000	0,000
		<i>1 m neben</i>	22,44	15,86	1,42	0,157	0,943
N_{Gesamt} (%)	<i>unter dem</i>	<i>unmittelbar neben</i>	-44,52	12,26	-3,63	0,000	0,002
		<i>1 m neben</i>	-36,17	17,34	-2,09	0,037	0,222
		<i>10m x 10m Raster</i>	-4,681	10,06	-0,47	0,64	1,0
	<i>1 m neben</i>	<i>unmittelbar neben</i>	8,35	17,34	0,482	0,63	1,0
	<i>10m x 10m Raster</i>	<i>unmittelbar neben</i>	39,83	10,06	3,96	0,000	0,000
		<i>1 m neben</i>	31,49	15,86	1,99	0,047	0,283
C_{Gesamt} (%)	<i>unter dem</i>	<i>unmittelbar neben</i>	-28,8	12,26	-2,4	0,019	0,113
		<i>1 m neben</i>	-7,32	17,34	0,422	0,67	1,0
	<i>1 m neben</i>	<i>unmittelbar neben</i>	21,49	17,34	1,24	0,215	1,0
	<i>10m x 10m Raster</i>	<i>unter</i>	23,44	10,06	2,33	0,02	0,119
		<i>unmittelbar neben</i>	52,25	10,06	5,19	0,000	0,000
		<i>1 m neben</i>	30,76	15,86	1,94	0,052	0,314
N_{org} in % von C_{org}	<i>unter dem</i>	<i>1 m neben</i>	-37,18	17,34	-2,15	0,032	0,192
		<i>10m x 10m Raster</i>	-59,62	10,06	-5,93	0,000	0,000
	<i>unmittelbar neben</i>	<i>unter</i>	0,424	12,26	0,035	0,972	1,0
		<i>1 m neben</i>	-37,61	17,34	-2,17	0,03	0,18
		<i>10m x 10m Raster</i>	-60,05	10,06	-5,97	0,000	0,000
	<i>1 m neben</i>	<i>10m x 10m Raster</i>	-22,44	15,86	-1,42	0,157	0,943
Glühverlust	<i>unter dem</i>	<i>unmittelbar neben</i>	-14,61	5,51	-2,65	0,008	0,048
		<i>1 m neben</i>	-5,18	7,79	-0,67	0,506	1,0
	<i>1 m neben</i>	<i>unmittelbar neben</i>	9,42	7,79	1,21	0,226	1,0

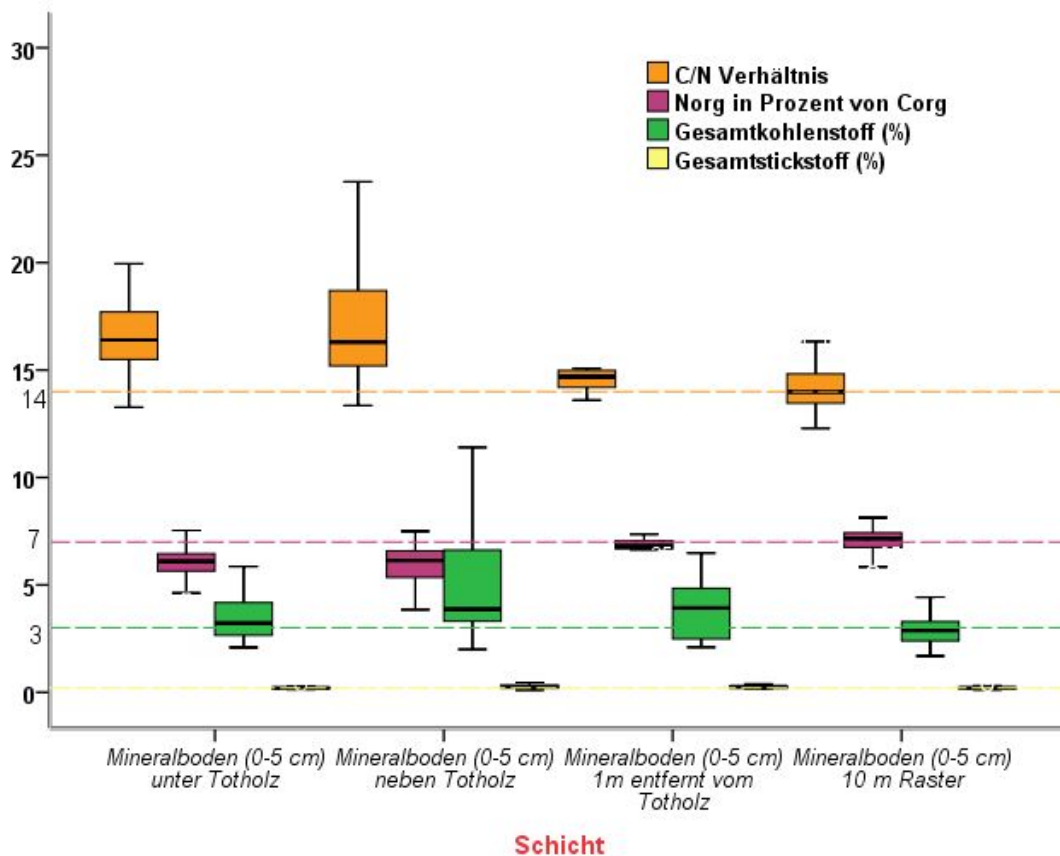


Abb. 4.4-8: Boxplots der Analysewerte des Oberbodens (Tiefenstufe 0–5 cm) – *unmittelbar unter dem Totholz*, *unmittelbar seitlich angrenzend*, *in 1 m seitlicher Entfernung vom Totholz* sowie als Kontrollstichprobe die *10 m x 10 m Rasterwerte* – mit Darstellung des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff

Die in der Abb. 4.4-8 und Tab. 4.4-5 wiedergegebenen bodenchemischen Analyseergebnisse zeigen unter Auswertung des paarweisen Signifikanztests:

1. Signifikante Unterschiede in den Mittelwerten des prozentualen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalts der Mineralböden für die Tiefenstufe (0–5 cm) zwischen den Entnahmeorten *unmittelbar neben dem Totholz* (im Vergleich deutlich höhere Werte) und *dem 10 m x 10 m Raster*. Die Mittelwerte des prozentualen Stickstoffgehalts *unmittelbar neben dem Totholz* sind zudem deutlich höher als die *unmittelbar unter dem Totholz* entnommenen und unterscheiden sich signifikant voneinander (Tab. 4.4-10).
2. Die paarweise Signifikanzprüfung der Werte des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff und des C/N-Verhältnisses der Bodenproben (Tiefenstufe 0–5 cm) ergab gesicherte Unterschiede zwischen den Entnahmeorten *unter* und *neben dem Totholz* sowie den *10 m x 10 m Raster* Analysewerten. Das C/N-Verhältnis ist im Vergleich zu den *10 m x 10 m Raster* Werten *unter* und *unmittelbar neben dem liegenden Totholz* weiter und der prozentuale Anteil des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff deutlich geringer.
3. Signifikant höhere organische Restbestandteile (höherer Glühverlust) sind in der Tiefenstufe (0–5 cm) am Entnahmeort *unmittelbar neben dem liegenden Totholz* im Vergleich zu den Werten *unter dem liegenden Totholz* festgestellt worden.

4. Keine signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten der Analyseergebnisse des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff bestehen in der Tiefenstufe (0–5 cm) zwischen den Beprobungsorten *1 m Entfernung vom liegenden Totholz* und den entsprechenden Werten des *10 m x 10 m Rasters*.
5. Daraus folgt, dass das durch die Totholzmineralisation freigesetzte Überangebot an Kohlenstoff aus dem Totholz innerhalb weniger Jahrzehnte fast vollständig zu Kohlendioxid umgesetzt und an die Atmosphäre abgegeben wurde. In der Tiefenstufe (0–5 cm) *unter* und *neben dem Totholz* befinden sich am Ende des Mineralisierungsprozesses nur geringfügig höhere Kohlenstoffanteile.
6. Der Prozess der Totholzmineralisierung ist durch eine hohe mikrobielle Aktivität geprägt, die sich im deutlich geringeren Anteil des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff der Tiefenstufe 0–5 cm *unter* und *neben dem Totholz* (Traufbereich) äußert.

Kurze Zusammenfassung

- Durch den Zusammenbruch des Altbestandes wurden insgesamt 141 t C/ha und 446 kg N/ha auf der *Kuppe*, 59 t C/ha und 204 kg N/ha auf dem *Hang* sowie 220 t C/ha und 669 kg N/ha in der *Senke* freigesetzt (konservative Schätzung auf der Basis der Erstinventur-Einzelbaumdaten).
- Die Wiederholungsbeprobung (2012) je eines Bodenprofils der *Kuppe* und *Senke* zeigt bei höheren N- und C-Ausgangswerten auf der *Kuppe* (1968) einen Anstieg beider Elemente in den Profilen. Im Vergleich (1968er zu 2012er Werte) blieb das C/N-Verhältnis im Profil *Senke* konstant, das im Profil *Kuppe* verbesserte sich um eine ganze Stufe.
- Eine vergleichende Beprobung der *Auflage* von zehn Totholzresten der Buche mit dem Mineralboden der Tiefenstufe (0–5 cm) *unter*, *direkt neben*, in *1 m Entfernung* vom Totholz sowie der Vergleich mit der 10 m x 10 m Rasterbeprobung derselben Tiefenstufe ergab:
 - Die Analysewerte der Totholzaufgaben variieren aufgrund unterschiedlichen Zersetzungsgrades des Totholzes sehr stark:
 C_{Gesamt} und der Anteil organischen Materials (Glühverlust) der Auflage sind um ein Vielfaches höher und das C/N-Verhältnis um ein Vielfaches weiter als im Mineralboden (Tiefenstufe 0–5 cm), der N_{Org} in Prozent von C_{Org} -Wert hingegen nur etwa halb so groß.
 - Signifikant deutlich höhere C- und N-Gehalte in der Tiefenstufe (0–5 cm) *direkt neben* dem Totholz konnten im Vergleich zur 10 m x 10 m Rasterbeprobung beobachtet werden.
 - Der N-Gehalt (Tiefenstufe 0–5 cm) *direkt neben* dem Totholz ist signifikant höher als *unter dem* Totholz.
 - Das C/N-Verhältnis (Tiefenstufe 0–5 cm) *direkt neben* und *unter dem* Totholz ist im Vergleich zur 10 m x 10 m Rasterbeprobung signifikant weiter und N_{Org} in Prozent von C_{Org} deutlich geringer.
- Das freigesetzte Überangebot an C aus dem Totholz ist innerhalb weniger Jahrzehnte fast vollständig zu CO₂ umgesetzt und an die Atmosphäre abgegeben worden. In der Tiefenstufe (0–5 cm) *unter* und *neben dem Totholz* befinden sich am Ende des Mineralisierungsprozesses nur geringfügig höhere C-Anteile.

4.4.4 Diskussion der bodenkundlicher Ergebnisse und der Untersuchungen am liegenden Totholz

Das Ende der 1960er Jahre in den Flächen *Hang* und *Senke* begonnene und in den 1980er Jahren auch auf die Fläche *Kuppe* übergreifende Disintegrations- und Formierungsstadium führte zu einem zeitlich befristet auftretenden hohen Totholzanteil überwiegend starker Baumholzdimensionen. Hochgerechnet sind in den letzten vier Jahrzehnten durch das bis 2012 erfolgte Absterben und die nachfolgende Zersetzung des dort im Jahre 1958 bzw. 1968 vorhandenen Baumbestandes mit dem einzelbaumweise geschätzten oberirdischen Vorrat, insgesamt

- 141 t Kohlenstoff und 446 kg Stickstoff je Hektar auf der *Kuppe*,
- 59 t Kohlenstoff und 204 kg Stickstoff je Hektar am *Hang*, sowie
- 220 t Kohlenstoff und 669 kg Stickstoff je Hektar in der *Senke*

freigesetzt worden (KRAUß & HEINSDORF 2008).

Im Unterschied zu borealen Ökosystemen (KUUSELA 1990) führte dies auf den Kalkstandorten im Nordostdeutschen Tiefland langfristig zu keiner schlechteren Humusform und zu keiner für das Ökosystem schädlichen Biomasseanhäufung. Die mit dem Disintegrations- und Formierungsstadium einhergehende Auflichtung brachte eine gesteigerte Bodenaktivität hervor, erkennbar an der Etablierung des Großstrauches Schwarzer Holunder und nachfolgend der Berg-Ulme (einem Nitratzeiger aus dem Bergland bzw. Nordbuchenwald) in der räumlichen Nähe zum liegenden Buchen-Totholz. Der Zusammenhang zwischen hohen N-Einträgen und dem verstärkten Auftreten nitrophiler Vegetation, Holunder und Brennnessel, die mit ihrem dichten Netz von Feinwurzeln im Oberboden hohe Nitratmengen aufnehmen können, wurde für hessische Kalk-Buchenwälder dokumentiert (EICHORN 1995). Ähnlich der stickstoffaffinen Vegetation (insbesondere Drahtschmiele, Landreitgras, Brennnessel und Holunder) in Kiefernersatzforsten auf potentiellen Buchenwaldstandorten im Nordostdeutschen Tiefland erfüllen sie die „*Funktion als Stickstoffpuffer mit hohem jährlichen Umsatz*“ (BOLTE 1999, KAP.6.3.2).

Innerhalb von weniger als vier Jahrzehnten konnten die Stoffmengen in den untersuchten Buchenwaldökosystemen abgebaut werden. Dies steht im Einklang mit Untersuchungen in einem *Luzula*-Fagetum im Solling, wo in einem 160-jährigen Buchenbestand auf basenarmer Braunerde mit 1000 mm Jahresniederschlag für die Zersetzung von liegendem Buchenbaumholz eine mittlere Verweildauer von 33,8 Jahren beobachtet wurde (MÜLLER-USING & BARTSCH 2009, 291). Es entspricht in etwa dem Mittelwert des für *Sprödbbruch* von Buchenstämmen in einem Kalkbuchenwald des Hainichs mit 30 bis 40 Jahren berechneten Zersetzungszeitraums (KAHL 2008, 41).

Die Rekonstruktion zweier alter Bodenprofile (Abb. 3.2-2, 4.1-1), *Mercurialis-Lamium* Artengruppenkombination, aus der Zeit der Erstinventur (1968) und die vergleichende Wiederholungsbeprobung der Tiefenstufe 0–5 cm erlaubte einen Vergleich auf die Kohlenstoff- und Stickstoffausstattung im Oberboden zu Beginn und nach Abschluss des Integrations- und Formierungsstadiums ohne Anspruch auf flächige Repräsentativität (SEDLACZEK 2006, 51): Im Alt-Profil der *Kuppe* mit einer Kalktiefe bei 0,55 m stieg der N-Anteil von 0,23 % im Jahre 1968 auf 0,29 % im Jahre 2012 und der Kohlenstoffanteil von 3,2 % auf 4,2 %. Dies bedeutet einen relativ ausgeglichenen Anstieg um 28 % (N) bzw. 31 % (C), was zu einer Verengung des C/N-Verhältnisses auf 12,3 führte. Im Alt-Profil der *Senke*, Kalktiefe bei 0,80 m, stieg der N-Wert um 54 % (von 0,145 % auf 0,22 %) und der

Kohlenstoffwert um 17 % (von 2,4 % auf 2,8 %). Hier blieb das C/N-Verhältnis mit 14,4 fast konstant.

Die bodenkundlichen Untersuchungen des Mineralbodens in der Tiefenstufe 0–5 cm bestätigten nur teilweise die bereits durch die Vegetationsanalyse (Kap.4.2.6.1) anhand der Zuordnung der 95 Rasterpunkte zu den soziologischen Artengruppenkombinationen bekannten räumlichen Verteilungsmuster der bodenchemischen Werte. Sie entsprechen in der Gesamtschau mit einem Mittelwert des pH_{KCl} -Wertes von 5,5, des C/N-Verhältnisses von 14,21 und des N_{org} in % von C_{org} von 7,1 den typischen Eigenschaften einer Bodenbildung aus Geschiebemergel im nordostdeutschen Tiefland mit dem Humuszustand Mull (RIEK & STÄHR 2004, 92 f.).

Die Zuordnung der rasterbezogenen Bodenprobenanalyseergebnisse zu den in der Analyse der Vegetation gebildeten soziologischen Artengruppenkombinationen und die Varianzanalyse der bodenchemischen Werte ergab **keine** statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen der *Mercurialis-Lamium*, der *Aegopodium-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination. Anhand der Korrelationsanalyse nach Pearson konnte aber ein schwacher Zusammenhang zwischen der soziologischen Artengruppenkombination und dem Gesamtstickstoffgehalt festgestellt werden.

Festzustellen ist, dass der Oberboden, der von den beiden soziologischen Artengruppenkombinationen *Mercurialis-Lamium* und *Aegopodium-Lamium* bedeckt ist, im Vergleich zur *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination ein engeres C/N-Verhältnis, einen höheren pH_{KCl} -Wert und einen prozentual höheren Gesamtstickstoff zum Gesamtkohlenstoffverhältnis (N_{org} in % von C_{org}) aufweist und damit die vegetationsanalytisch hergeleiteten und statistisch abgesicherten Unterschiede in den dekadischen Trophiewerten ($\text{DK}_{\text{C/N}}$ und $\text{DK}_{\text{V\%}}$) zwischen den drei soziologischen Artengruppenkombinationen (Kap.4.2.6.1) bestätigt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der per Bohrstock und Feldmethode ermittelten Kalktiefe und dem rasterbezogen analysierten pH_{KCl} -Wert konnte nicht festgestellt werden. Anhand der Korrelationsanalyse nach Pearson ist ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen pH_{KCl} -Wert, dem Geländehöhenwert (Z) und der Hangrichtung zu beobachten. Ursächlich hierfür dürfte der laterale Stofftransport kalkhaltigen Materials hangabwärts durch die Bodenfauna und Hangwasser (im Winterhalbjahr und bei Starkregenereignissen) sein.

Da auch Standorte mit hoch anstehendem Kalk sicher durch die Vegetation angezeigt werden (Kap.4.2.6.1), bleibt festzuhalten, dass die flächendeckende Vegetationsaufnahme (und deren Analyse über die Bildung soziologischer Artengruppenkombinationen mit der nachfolgenden Berechnung der dekadischen Weiserwerte) eine im Vergleich zur 10 m x 10 m Rasterbeprobung der Tiefenstufe 0–5 cm geeignetere Methode zur Herausarbeitung gradueller Oberbodenzustandsunterschiede dieser eutrophen Kalkstandorte darstellt.

Die bodenchemischen Werte der Standorte der drei festgestellten Waldökosystemtypen unterscheiden sich signifikant in der Tiefe des anstehenden Kalks. Im pH_{KCl} -Wert konnten signifikante Unterschiede zwischen dem *Bingelkraut-Buchen* und *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* festgestellt werden. Ein schwacher Kausalzusammenhang ist zwischen den Standorten des Waldökosystemtyps und dem Gesamtstickstoffgehalt sowie dem

Gesamtkohlenstoffgehalt der Tiefenstufe 0–5 cm gegeben. In beiden Fällen wird das Signifikanzniveau von ($P = 0,05$) knapp verfehlt. Die Ursachen für die geringfügigen Unterschiede in den bodenchemischen Werten der Waldökosystemtypen sind u. a. in dem kleinflächigen Nebeneinander der drei Untersuchungsflächen bei gleichzeitig bewegtem Relief zu suchen, die einen lateralen und vertikalen Stofftransport (Bioturbation und Basenpumpeffekt) auf den Waldboden begünstigten und insgesamt einen gehobenen Gleichgewichtszustand des Oberbodens hervorbrachten (KOPP & SCHWANECKE 1994). Das grundwasserferne Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldökosystem hat den vergleichsweise höchsten pH_{KCl} -Wert, das engste C/N-Verhältnis, den höchsten Anteil organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff sowie den am höchsten anstehenden Kalk.

In einer Untersuchung über Buchenvorkommen an der östlichen Buchenwald-Verbreitungsgrenze im polnischen Tiefland wird von TARASIUŁ auf die große Bedeutung des Bestandesmikroklimas innerhalb des Standortfaktorenkomplexes verwiesen: Dieses Bestandesmikroklima ist deshalb sehr schwer zu quantifizieren, da „*ungünstige Auswirkungen des einen Faktors durch positive Wirkungen anderer Faktoren kompensiert werden können*“ (TARASIUŁ 1999, zit. nach CZAJKOWSKI 2006, 14). In der vorliegenden Untersuchung erweist sich die Weise'sche Oberhöhe $[\text{H}_0]$ ¹⁹ als der Weiser zur Identifizierung des entscheidenden vegetationswirksamen Standortfaktors: Für das Wachstum der Buche ist die in der Vegetationsanalyse herausgearbeitete erhöhte Luftfeuchte und Kühle des *Bingelkraut-Buchenwaldes* im unteren bis mittleren Teils der Fläche *Hang* entscheidend (Tab. 4.2-20). Obwohl der grundwasserferne *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* die vergleichsweise höchsten $\text{DK}_{\text{C/N}}$ - und $\text{DK}_{\text{V\%}}$ -Werte hat, liegt die Oberhöhe der Buchen sowohl in der Erst- als auch in der Wiederholungsinventur deutlich unter der des *Bingelkraut-Buchenwaldareals* des Unter-Hangs (Tab. 4.4-11).

Tab. 4.4-11: Oberhöhen der Buchen in der Erst- und Wiederholungsinventur

Fläche	Ökosystem	Weise'sche Oberhöhe [m] Erstinventur 1958/68 ($D_{1,3}$ [cm])	Mittelwert des Buchenrestvorrats [m] der Wiederholungsinventur 2012 ($D_{1,3}$ [cm])
Unter- bis Mittel-Hang	<i>Bingelkraut-Buchen</i>	39,0 (101,0)	38,9 (Restvorrat) (126,5)
Kuppe	<i>Bingelkraut- Winterlinden-Buchen</i>	35,0 (81,3)	32,5 (Restvorrat) (100,8)
Senke	<i>Eschen-Buchen</i>	37,3 (90,2)	-

Bei der Inventur des liegenden Totholzes überwogen mit 84 % der Stammzahl der in Zersetzung begriffenen Buchen-Totholzreste, die aus *Sprödbbruch* oder *dichteabhängiger Mortalität* (KAHL 2008, 11), stammten. Mit 16 % Anteil an den liegenden Totholzresten konnte aufgrund der vorgefundenen Totholzlängen Windwurf als Entstehungsursache angenommen werden. Dies entspricht in etwa den Verteilungsverhältnissen im untersuchten Kalkbuchenwald im Nationalpark Hainich (KAHL 2008, 11).

¹⁹ WEISE'sche Oberhöhe $[\text{h}_0]$ entspricht der Höhe des Grundflächenmittelstammes der 20 % stärksten Bäume eines Bestandes.

Die einzelnen Analyseergebnisse der Totholzaufgabe (Glühverlust, Gesamtkohlenstoff, Gesamtstickstoff, C/N-Verhältnis, N_{org} in % von C_{org}) variieren untereinander mit dem Faktor 2 bis 3 zwischen den jeweiligen Minimal- und Maximalwerten und sind im unterschiedlichen Grad der bereits stattgefundenen Holzzersetzung (Fragmentierung und Auswaschung) begründet. Der mittlere C-Anteil entsprach mit 46,76 % fast genau dem in Buchentotholz im Hainich beobachteten Mittelwert von 45,15 % (KAHL 2008, 35). Der mittlere N-Anteil war mit 1,28 um ein Mehrfaches höher als die im Hainich mit 0,145 % beobachtete (KAHL 2008, 35). Wahrscheinlich war dieser beobachtete höhere Wert das Ergebnis des Wirkens von stickstofffixierenden Bakterien, die den holzabbauenden Pilzen Stickstoff zuführen und „*sie gleichsam zu Spitzenleistungen antreiben*“ (BARDELLI ET AL. 2017, 1041 ff.). Ein weiterer Erklärungsansatz wird von anderen Autoren vertreten, die eine pilzlich verursachte Translokation von Stickstoff als Ursache vermuten (KRAKINA ET AL. 1999, 20 ff.).

Das daraus resultierende relative enge C/N-Verhältnis der Auflage (zwischen 24 im Minimum und 64 als Maximalwert) weist auf die lange Lagerdauer und den weit fortgeschrittenen Abbauprozess hin (MÜLLER-USING & BARTSCH 2007, 19).

Es konnten signifikante Unterschiede in den Mittelwerten des prozentualen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalts der Mineralböden für die Tiefenstufe (0–5 cm) zwischen den Entnahmeorten *unmittelbar neben* dem Totholz (Traufbereich) und *den* 95 Beprobungspunkten des *10 m x 10 m Rasters* festgestellt werden. Mit 4,8 % zu 2,98 % und 0,27 % zu 0,21 % sind im Traufbereich höhere Werte beobachtet worden. Ähnlich den Untersuchungsergebnissen im Kalkbuchenwald Hainich bestanden jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen und den in *1 m Entfernung zum Totholz* entnommenen Bodenproben (KAHL 2008, 65 f.).

Gleichzeitig unterschieden sich die Mittelwerte des prozentualen Stickstoffgehalts *unmittelbar neben dem Totholz* (Traufbereich) signifikant von den *unmittelbar unter dem Totholz* entnommenen und wiesen mit 0,27 % zu 0,20 % ein höheres Niveau auf.

Die N-Konzentration war unter Totholz in 0–5 cm Bodentiefe niedriger als beim Entnahmeort *1 m entfernt* (Kontrolle), wie es auch im Hainich beobachtet wurde (KAHL 2008, 70 f.). Es bestand jedoch keine Signifikanz.

Die paarweise Signifikanzprüfung der Werte des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff und des C/N-Verhältnisses der Bodenproben (Tiefenstufe 0–5 cm) ergab gesicherte Unterschiede zwischen den Entnahmeorten *unter* und *neben dem Totholz* (Trauf) sowie den systematisch verteilt beprobten *10 m x 10 m Raster*-analysewerten. Das C/N-Verhältnis ist im Vergleich zum *10 m x 10 m Raster unter* und *unmittelbar neben* dem liegenden Totholz (Trauf) weiter und der prozentuale Anteil des organischen Stickstoffs am organischen Kohlenstoff deutlich geringer. Es ist Ergebnis des Kohlenstoffeintrags aus dem Totholz in den Oberboden. Im Kalkbuchenwald des Hainichs konnte der Kohlenstoffeintrag aus dem Totholz in Form von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) in den Mineralboden nachgewiesen werden (KAHL 2008, 49 ff.). Er stellte schlussfolgernd fest, dass der Austausch des Bodenkohlenstoffs zu einer verstärkten Mineralisierung des vorhandenen Bodenkohlenstoffs im Boden führte, und schätzte ein, dass dieser den vorhandenen Bodenkohlenstoff im Verlaufe des Totholzabbaus bis zu einem Anteil von etwa 20 % ersetzt (KAHL 2008, 90).

Keine signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten der Analyseergebnisse des Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffanteils, der C/N-Verhältnisse und des prozentualen Anteils des organischen Stickstoffanteils am Gesamtkohlenstoff bestanden zwischen den Beprobungsorten *1 m Entfernung vom liegenden Totholz* (Kontrolle) und den 95 beprobten Punkten des *10 m x 10 m Rasters*.

Signifikant höhere organische Restbestandteile (höherer Glühverlust) sind in der Tiefenstufe (0–5 cm) *unmittelbar neben dem liegenden Totholz* (Traufbereich) im Vergleich zum Entnahmeort *unter dem liegenden Totholz* festgestellt worden. Da der Traufbereich auch für den Eintrag gelösten Kohlenstoffs in den Untersuchungen im Kalkbuchenwald des Hainichs als ein Ort identifiziert wurde, der in der Hälfte der untersuchten Beprobungsorte höhere Eintragsraten im Vergleich zum Entnahmeort *unter dem liegenden Totholz* aufwies (KAHL 2008, 50), scheint er für den Stoffeintrag aus dem Totholz in den Mineralboden von Bedeutung zu sein.

Eine Erklärung für die unterschiedlichen Stoffeinträge zwischen den Beprobungsorten *unter* und *unmittelbar neben dem Totholz* (Trauf) dürfte auch in der Beobachtung begründet sein, dass es sich bei den Totholzresten auf den terrestrischen Standorten der *Kuppe* und des *Hangs* überwiegend um die Erdstammstücke handelte. Diese kamen nach Abbruch der Krone und des oberen Stammabschnitts (*Sprödbbruch*) um Jahre zeitlich verzögert in Kontakt mit dem Oberboden. Je nach der dann erfolgten Fallrichtung traf das Erdstammstück auf einen bisher nicht vom Totholz (*Sprödbbruch*) kontaktierten Oberboden oder aber es fiel auf eine bereits durch Stoffeintrag des zuvor mineralisierten Totholzes „vorbereitete“ Stelle. Dem Beprobungsdesign um das individuelle Totholzstück kommt deshalb zum Nachweis von Stoffeinträgen bei der Totholzzersetzung eine hohe Bedeutung zu. Dies setzt die genaue (historische) Lagekenntnis des Totholzes zum Fallzeitpunkt und seiner ggf. bereits mineralisierten Anteilstücke voraus, um dem beschriebenen Problem *der „hohe[n] räumliche[n] Variabilität pedogener Eigenschaften, die die Kohlenstoffspeicherung im Boden maßgeblich bestimmen [und, Anm. d. Verf.] den Nachweis signifikanter Effekte der forstlichen Nutzung auf die Boden-C-Vorräte sehr erschwert“* (MUND 2004, 182), zu begegnen. Auf die Bedeutung der Dokumentation der Totholzlage weist bereits STÖCKER (1999, 25) am Beispiel von Kiefern- und Fichtentotholz in Ur- und Naturwäldern hin.

Auf die von KAHL (2008, 83) festgestellten deutlich geringeren Trockenrohdichten unter Totholz infolge Bioturbation, die für die geringen Kohlenstoffvorräte in 0–5 cm Bodentiefe verantwortlich schienen, konnte in der vorliegenden Untersuchung methodenbedingt nicht eingegangen werden.

In der Gesamtbilanz der Stoffeintragsuntersuchung durch Buchentotholz ist anzumerken, dass auf den eutrophen, kalkhaltigen Buchenwaldstandorten im Nordostdeutschen Tiefland die Zersetzung von starken Buchen einen geringen Einfluss auf den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt des Oberbodens der Tiefenstufe 0–5 cm hat. Beobachtungen im Kalkbuchenwald des Hainichs, die einen geringen Unterschied in der organischen Bodenkohlenstoffkonzentration unter Totholz und der Kontrolle feststellten, ist zuzustimmen (KAHL 2008, 65). Ebenso wie der im Luzulo-Fagetum des Sollings abschließend gezogenen Schlussfolgerung, dass die *„im Vergleich zu der Menge der im lebenden Bestand und im Auflagehumus gespeicherten Nährstoffe [...] die N-Vorräte im Totholz eine untergeordnete*

Rolle [spielen, Anm. d. Verf.]“ (MÜLLER-USING & BARTSCH 2007, 21). Die Erkenntnis, dass die Zersetzung von starkem Totholz einen bedeutenden Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung in Ökosystemen hat (YATSKOV ET AL. 2003) und ein bedeutendes Langzeit-Stickstoffreservoir darstellt (HARMON ET AL. 1986), ist sicherlich für die von den Autoren untersuchten Ökosysteme richtig. Ihr kann aber aufgrund der hohen Ausgangsvorräte im Oberboden und der Streuschicht der untersuchten eutrophen Kalkbuchenökosysteme nicht beigepllichtet werden.

4.5 Schätzung der aktuellen Strahlungsverhältnisse mittels hemisphärischer Fotos

Seit den Anfängen der Lichtmessung im Wald werden die in den Beständen gemessenen bzw. geschätzten Strahlungswerte in Prozent des Freiflächenlichtes angegeben (WIESNER (1907). Die in den nachfolgenden Darlegungen dargestellten prozentualen Anteile des Direct Site Factor (DIRSF), Indirect Site Factor (DIFFSF) sowie Total Site Factor (TOTSF) an den jeweiligen Freiflächenwerten geben nicht die pflanzenverfügbare photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) an. Trotzdem sind sie gute Weiser für die Vielzahl der in Wachstumsuntersuchungen festgestellten Zusammenhänge und es bestehen insbesondere zwischen den relativen Anteilen der modellierten diffusen Strahlungsanteile des Indirect Site Factor (DIFFSF) und der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) eine enge Korrelation (BRUNNER 1993). Die räumliche Variation des Lichtfeldes im Altbestand, im Sinne der horizontalen Variation der Lichtstärke, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig - von der Messhöhe im Bestand, der Jahreszeit, der Außenhelligkeit, der Messperiode, der Größe des Sensors und dem Bestandesaufbau (BRUNNER 1993). Der Bestandesaufbau wird insbesondere durch zwei Variablen bestimmt – die Baumartenzusammensetzung, d. h. dem etablierten Waldökosystem, und die Wuchs- bzw. Höhenklasse und somit der Waldentwicklungsphase (BRUNNER 1993; TABAKU 1999).

4.5.1 Strahlungssituation im strahlungsreichen Frühjahr

4.5.1.1. Vergleich der Strahlungsverhältnisse in den etablierten Waldökosystemen

Eine zusammenfassende Darstellung des prozentualen Anteils der Kronendachlücken sowie der relativen Anteile des DIRSF, des DIFFSF und des TOTSF an der modellierten Sonneneinstrahlung in den drei Waldökosystemen sind der Abb. 4.5-1 zu entnehmen: Die Unterschiede in den Strahlungsverhältnissen und den beobachteten Lücken zwischen den drei Waldökosystemen im unbelaubten Zustand (der modellierten Sonneneinstrahlung im strahlungsreichen Frühjahr) sind gering und nicht signifikant (Prüfung durch einfaktorielle und mehrfaktorielle Varianzanalysen). Die Strahlungswerte variieren im jeweiligen Medianwert der untersuchten Größen zwischen den drei Waldökosystemen um etwa zwei bis drei Prozentpunkte der Freiflächenstrahlung. Das heißt, bei den prozentualen Lückenanteilen konnten Medianwerte zwischen 31 % und 33 % und bei den jeweiligen Strahlungsstandortsfaktoren Medianwerte zwischen 51 % und 54 % der entsprechenden Freiflächenwerte geschätzt werden. Trotz der geringen Unterschiede zwischen den Waldökosystemen erreicht bei allen vier untersuchten Indikatoren (Lückenprozent und die drei Strahlungsstandortsfaktoren) der Median des *Bingelkraut-Buchenwaldes* den jeweils niedrigsten Wert mit der jeweils geringsten Streuung (Abb. 4.5-1).

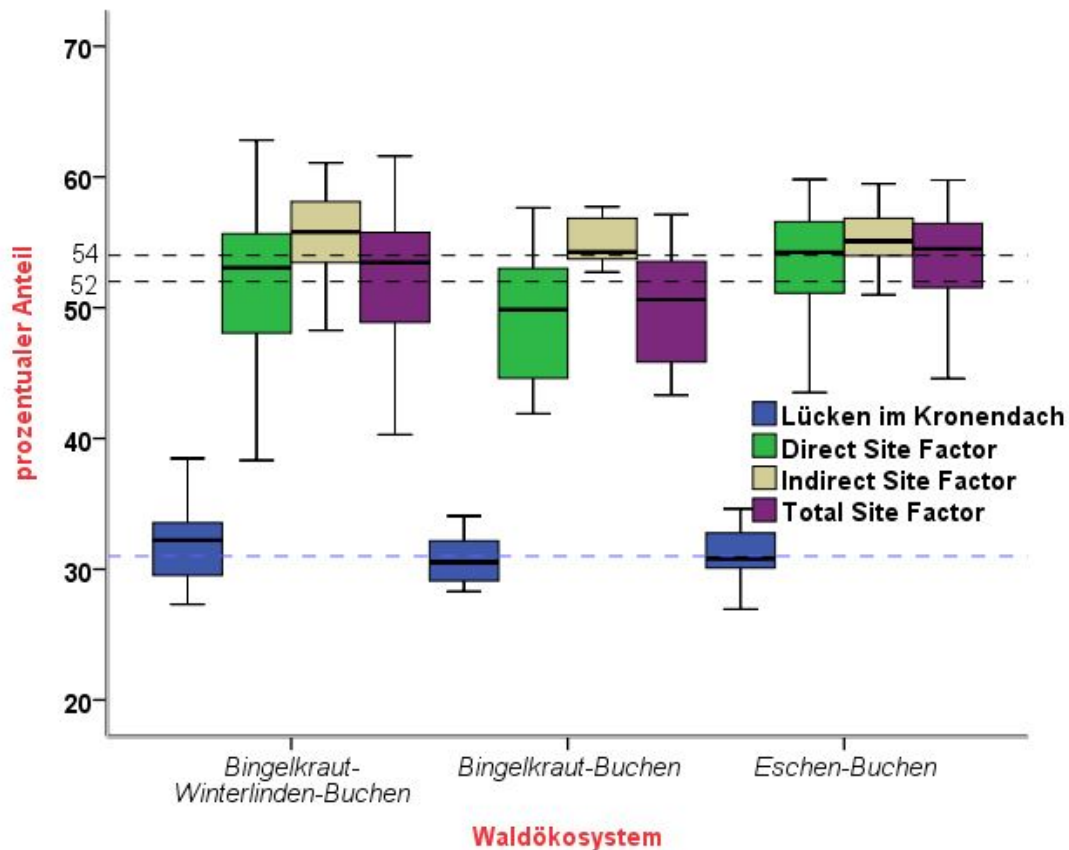


Abb. 4.5-1: Boxplots der Größe der Kronendachlücken (Openness) sowie der relativen Anteile von DIRSF, DIFFSF und TOTSf in Prozent der Freiflächenstrahlung in 0,35 m Höhe der drei Waldökosysteme im entlaubten Zustand (Strahlungsfrühjahr)

Im Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald ist im Winterhalbjahr eine etwas höhere Streuung der Werte im Vergleich zu den beiden anderen Waldökosystemen zu beobachten. Hier wurden auch die höchsten Medianwerte der Lückenprozente im Kronendach und des prozentualen Anteils der diffusen Strahlung am Freiflächenwert festgestellt, während im Eschen-Buchenwald sehr ausgeglichen der Medianwert bei jeweils ca. 54 % des Freilichtwertes beobachtet werden konnte.

4.5.1.2 Vergleich der Strahlungsverhältnisse zwischen den Höhen- bzw. Wuchsklassen

Die Auswertung der Statistik der aus dem normalisierten Oberflächenmodell (Abb. 4.2-9) ermittelten 624 Lücken zeigte, dass die Wuchsklasse „Lücke“ aufgrund zu geringer Flächengröße lichtökologisch vernachlässigbar ist (Mittelwert bei 2,5 m²; Standardabweichung 7 m²). Die Abb. 4.5-2 zeigt die Medianwerte der Strahlungsgrößen DIFFSF, DIRSF und TOTSf, gruppiert nach Höhenklassen im strahlungsreichen Frühjahr.

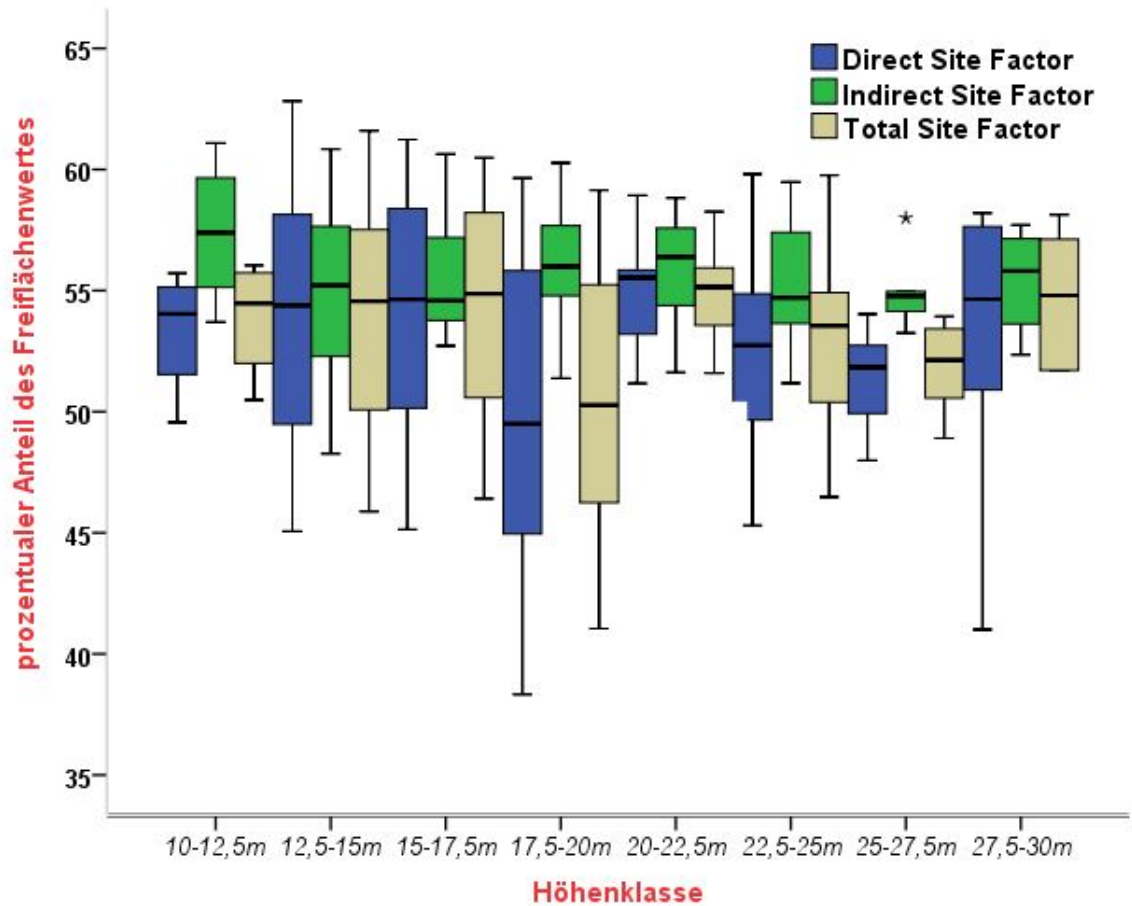


Abb. 4.5-2: Boxplots von DIFFSF, DIRSF und TOTSF in Fisheye-Aufnahmen in 0,35 m Höhe differenziert nach Höhenklassen der Bestockung im entlaubten Zustand (Strahlungsfrühjahr)

Die Strahlungsfaktoren nach Höhenklassen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (einfaktorielle Varianzanalyse), ein Trend ist nicht erkennbar. Sie bewegen sich zwischen 49,5 % und 55,5 % (DIRSF), 54,5 % und 57,5 % (DIFFSF) sowie 50,5 % und 55 % (TOTSF) der jeweiligen Freiflächenstrahlungswerte. Für die durch Zusammenlegung aus den Bestandeshöhenklassen gebildeten Wuchsklassen Stangenholz und Baumholz konnten gesicherte Differenzierungen festgestellt werden. Zum Ausschluss der möglichen Einflussgröße Hangneigung und Exposition wurden nur die Strahlungswerte der beiden in ebener Lage befindlichen Flächen *Kuppe* und *Senke* betrachtet. Die Wuchsklassen Stangenholz und Baumholz unterschieden sich hinsichtlich der Medianwerte des DIRSF und des TOTSF signifikant ($\alpha < 0,01$) voneinander (Tab. 4.5-1). Der Medianwert für das Stangenholz erreicht in beiden Strahlungsarten etwa 56 % und der des Baumholzes ca. 54 % der jeweiligen Freiflächenwerte. Der Medianwert für den DIFFSF ist mit 55 % der Freiflächenstrahlung in beiden Wuchsklassen gleich hoch, Abb. 4.5-3.

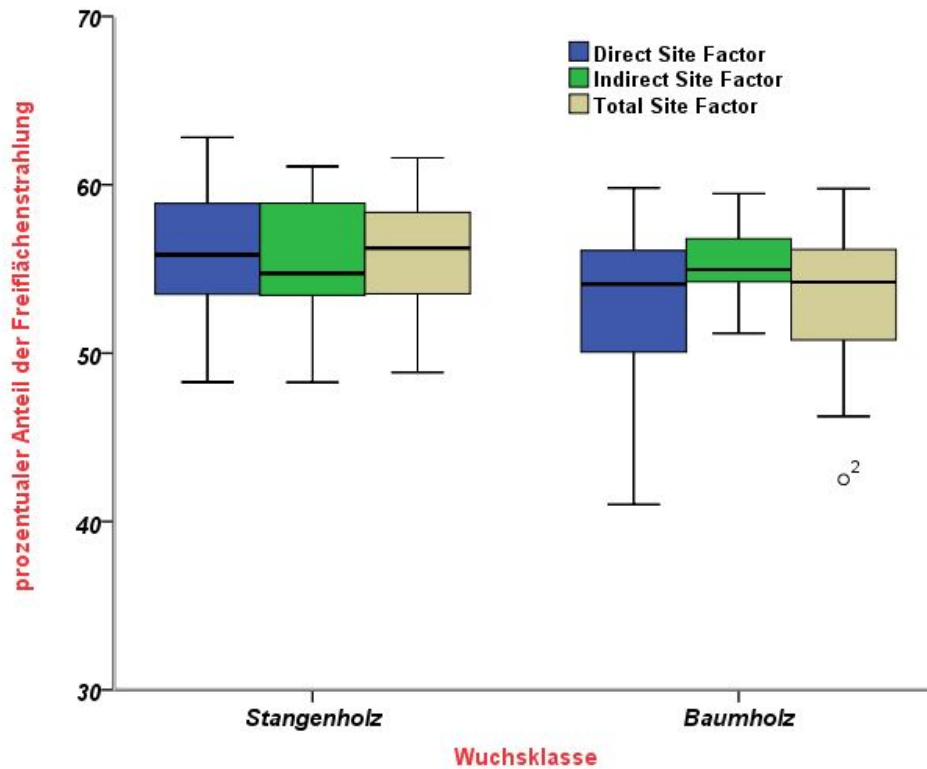


Abb. 4.5-3: Boxplots von DIFFSF, DIRSF und TOTSF in Prozent der Freiflächenstrahlung der beiden Wuchsklassen Stangenholz und Baumholz im entlaubten Zustand (Strahlungsfrühjahr)

Die Unterschiede zwischen den Faktoren DIRSF und TOTSF beider Wuchsklassen im Strahlungsfrühjahr sind gering und nicht signifikant (Tab. 4.5-1 und 4.5-2). Die Homogenität der Varianzen als Voraussetzung der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte beider Wuchsklassen ist nicht gegeben.

Tab. 4.5-1: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Strahlungsgrößen der Wuchsklassen Stangenholz und Baumholz im Strahlungsfrühjahr

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
DIRSF	zwischen den Gruppen	492,905	2	246,452	9,069	0,000
DIFFSF	zwischen den Gruppen	5,309	2	2,654	0,334	0,275
TOTSF	zwischen den Gruppen	383,857	2	191,928	8,903	0,000

Tab. 4.5-2: Test auf Homogenität der Varianzen (bei $P > 0,05$ Homogenität gegeben)

	Levene Statistik	df1	df2	Signifikanz
DIRSF	4,355	2	51	0,018
DIFFSF	3,845	2	51	0,028
TOTSF	5,160	2	51	0,009

Zur Prüfung der Unterschiede zwischen den Wuchsklassen ist der nichtparametrische Kruskal-Wallis-Test zusätzlich herangezogen worden. Die Ergebnisse zeigen durchaus unterschiedliche zentrale Tendenzen des DIRSF und TOTSF beider Wuchsklassen, wohingegen der mittlere Rang des DIFFSF beider Wuchsklassen sich ähnelt. Die

Unterschiede in den Faktoren DIRSF und TOTSF sind jedoch nicht signifikant (Tab. 4.5-3). Insofern bestätigt dieser Test die vorherigen Varianzanalysenergebnisse.

Tab.4.5-3: Statistik des Kruskal-Wallis-Tests mit Prüfung der Gruppenvariable Wuchsklasse

	DIRSF	DIFFSF	TOTSF
Chi-Quadrat	2,001	0,075	2,043
df	1	1	1
Asymptotische Signifikanz	0,157	0,785	0,153

In der Betrachtung der Strahlungsgrößen im Frühjahr sind räumliche Unterschiede vorhanden (Abb. 4.5-4): Die höchsten DIRSF- und TOTSF-Werte (Abb. 4.5-4, links und rechts) konnten mit Werten von 55 % bis 60 % in der Osthälfte der Senkenfläche (Einfluss des Waldrandes), mit 55 % bis 62 % im Nordwestquadranten der Kuppenfläche (durch die Kronendachlücke im Zentrum der Fläche begünstigt) und mit Werten von 55 % bis 60 % als schmaler Streifen von Nordwest nach Nordost laufend in der Hangfläche beobachtet werden. Hingegen ist der mit der PAR-Strahlung eng korrelierte DIFFSF im Frühjahr bis auf einen Rasterpunkt mit Werten zwischen 50 % und 61 % des Freiflächenwertes (Abb. 4.5-4, Bildmitte) ebenso wie der Anteil der *Gap Fraction* zwischen 30 % und 35 % in den drei Untersuchungsflächen, fast gleich. Eine ergänzende Prüfung der Zusammenhänge zwischen den drei Strahlungsgrößen und Exposition und Hangneigung ergab aufgrund der zu kleinen Anzahl an Beobachtungswerten keine signifikanten Unterschiede.

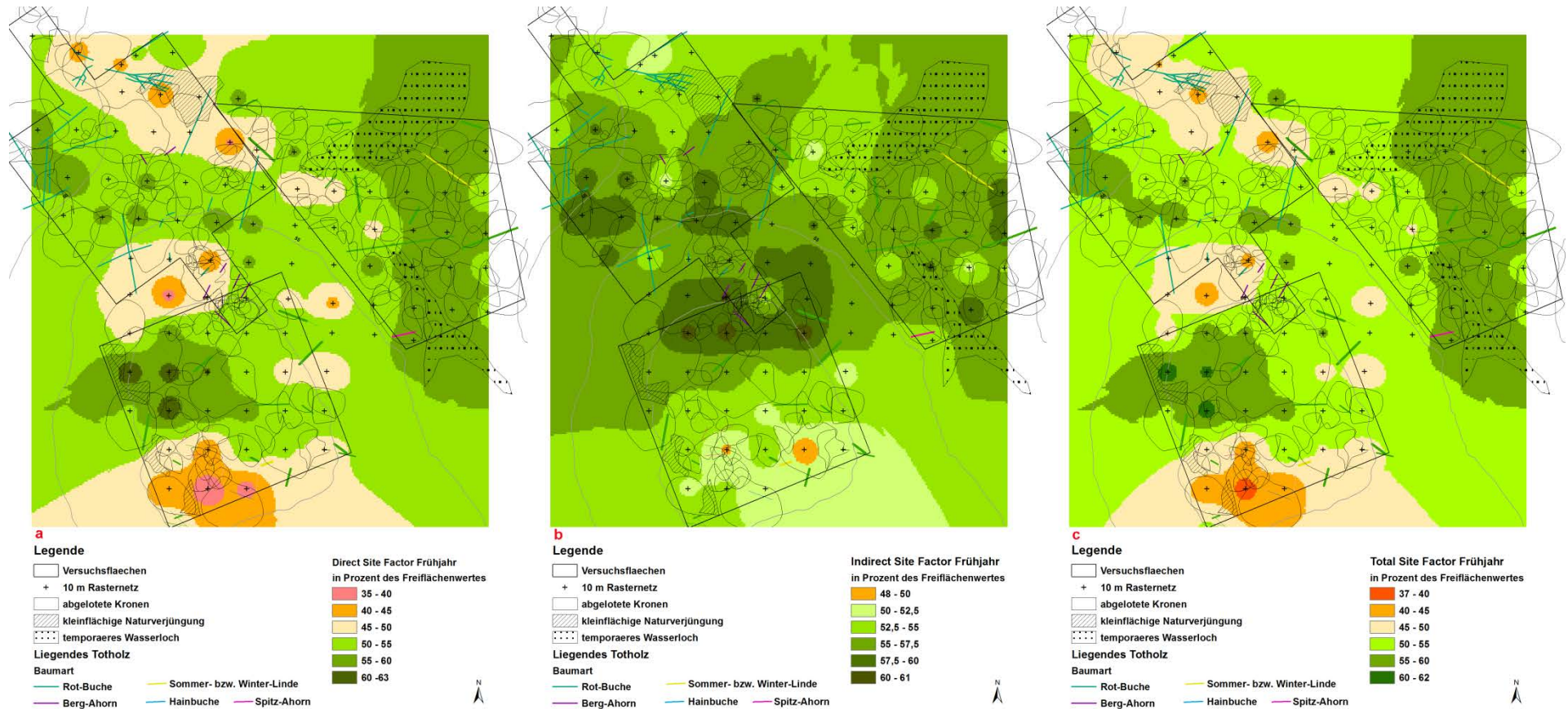


Abb. 4.5-4: Mittels räumlicher Interpolation aus je 95 hemisphärischen Einzelfotos in 0,35 m Höhe über dem Boden unter Nutzung der Software WinSCANOPY dargestellte prozentuale Anteile der Strahlungsgrößen (a) DIRSF, (b) DIFFSF und (c) TOTSF an der Freiflächenstrahlung im strahlungsreichen Frühjahr mit Darstellung der abgeloteten Kronenschirmflächen

4.5.2 Strahlungssituation im Sommerhalbjahr

4.5.2.1 Vergleich der Strahlungsverhältnisse in den etablierten Waldökosystemen

Erwartungsgemäß, da durch die Lage auf einen Mittel- bis Unterhang eines Nordwesthangs hervorgerufen, liegen auch im belaubten Zustand (Sommerhalbjahr) die Strahlungswerte und das Lückendargebot im Kronendach im *Bingelkraut-Buchenwald* stets geringfügig unter denen der beiden anderen Waldökosysteme: Der Lückenanteil hat einen Medianwert von etwa 6 %, der TOTSF erreicht ca. 8 % und der DIRSF ca. 7 % der Freiflächenstrahlung (Abb. 4.5-5). In der Strahlungssituation des durch Belaubung bedingten dunkleren Sommerhalbjahrs wurden mittels hemisphärischer Fotos in den jeweiligen Waldökosystemen nur etwa ein Fünftel der Lücken- und Strahlungswerte des Frühjahrs festgestellt (Abb. 4.5-1 und 4.5-5). Die absoluten Werte der Lücken und der drei Strahlungsstandortsfaktoren in den drei Waldökosystemen liegen eng beieinander.

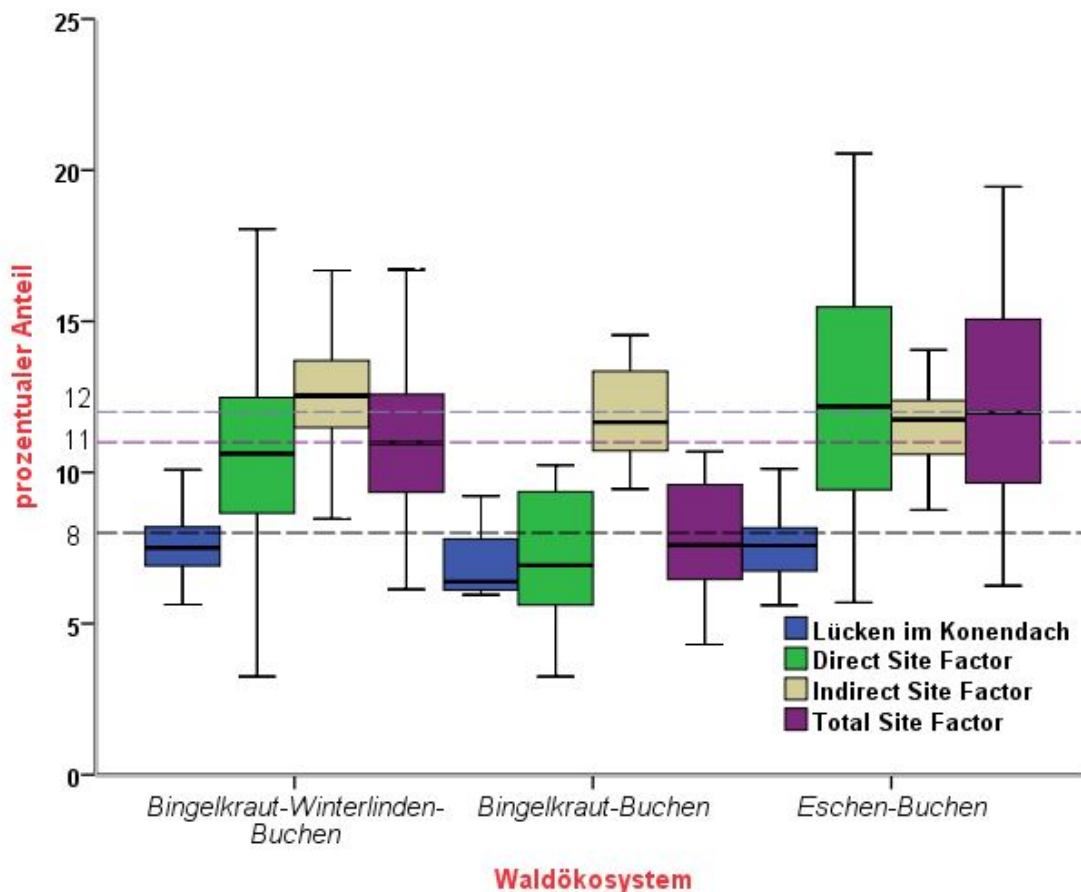


Abb. 4.5-5: Boxplots der Kronendachlücken (Openness) und der relativen Anteile von DIRSF, DIFFSF und TOTSF in Prozent der Freiflächenstrahlung in 0,35 m Höhe der drei Waldökosysteme im belaubten Zustand (Sommerhalbjahr)

Der DIFFSF hat mit einem Medianwert von etwa 12 % des Freiflächenwerts ähnliche hohe Werte wie in den anderen beiden Waldökosystemen. Eine mittlere Position innerhalb der untersuchten Strahlungsverhältnisse der drei Waldökosysteme nimmt der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* ein: Hier konnte der Medianwert bei etwa 7 % Lückenanteil im Kronendach in den hemisphärischen Fotos festgestellt werden. Der Medianwert des TOTSF wurde bei 11 %, der des DIRSF bei 10,5 % und der des DIFFSF bei fast 13 % berechnet.

Der *Eschen-Buchenwald* nimmt ganzjährig bei den relativen Anteilen des DIFFSF an der modellierten Sonneneinstrahlung den Spitzenplatz ein. Der Medianwert des relativen Anteils des TOTSF, des DIRSF und des DIFFSF beträgt jeweils etwa 12 % der jeweiligen Freiflächenwerte. Die einfaktorielle Varianzanalyse der Mittelwerte der modellierten Strahlungssituation im Sommerhalbjahr bestätigte bei bestehender Homogenität der Varianzen ($\alpha > 0,05$) zwischen den drei Ökosystemen signifikante Unterschiede in den Strahlungsgrößen des DIRSF, DIFFSF und TOTSF ($\alpha < 0,05$) (Tab. 4.5-4 und 4.5-5). Die Lückengröße (Gap Fraction) weist zwischen den drei Ökosystemen keine gesicherten Unterschiede auf.

Tab. 4.5-4: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Mittelwerte der Strahlungsgrößen gruppiert nach Waldökosystemen im Sommerhalbjahr (gesicherte Unterschiede fett hervorgehoben)

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
Gap Fraction	zwischen den Gruppen	3,005	2	1,503	1,258	,289
DIRSF	zwischen den Gruppen	0,18	2	0,009	6,347	0,003
DIFFSF	zwischen den Gruppen	0,003	2	0,001	4,754	0,011
TOTSF	zwischen den Gruppen	0,013	2	0,007	6,128	0,003

Tab. 4.5-5: Test auf Homogenität der Varianzen (Homogenität besteht bei $P > 0,05$)

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Gap Fraction	0,0271	2	92	0,763
DIRSF	0,590	2	92	0,556
DIFFSF	0,784	2	92	0,460
TOTSF	0,706	2	92	0,496

Ein zusätzlicher paarweiser Vergleichstest (multiple Varianzanalyse nach der Scheffé-Prozedur) bestätigte gesicherte Unterschiede zwischen den Waldökosystemen bei den modellierten Strahlungsgrößen

- Direct Site Factor (DIRSF) zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Bingelkraut-Buchenwald* sowie zwischen dem *Bingelkraut-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald*,
- Indirect Site Factor (DIFFSF) zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald*, sowie beim
- Total Site Factor (TOTSF) zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Bingelkraut-Buchenwald* sowie dem *Bingelkraut-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald* (Tab. 4.5-6).

Keine gesicherten Unterschiede zwischen den Waldökosystemen bestehen beim DIRSF und beim TOTSF zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald*, beim DIFFSF zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Bingelkraut-Buchenwald* und ebenfalls beim DIFFSF zwischen dem *Bingelkraut-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald*.

Tab. 4.5-6: Multipler Mittelwertvergleich durch paarweise Signifikanzprüfung der Strahlungswerte (gesicherte Unterschiede fett hervorgehoben)

Variable	Waldökosystem	Waldökosystem	P-Wert	95 % Konfidenzintervall	
				Untergrenze	Obergrenze
DIRSF	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,015 0,475	0,0068 - 0,305	0,078 0,01
	<i>Bingelkraut-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,015 0,003	- 0,78 - 0,089	- 0,0068 - 0,016
	<i>Eschen-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Bingelkraut-Buchen</i>	0,475 0,003	- 0,01 0,016	0,0305 0,089
DIFFSF	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,491 0,013	- 0,0081 0,002	0,023 0,02
	<i>Bingelkraut-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,491 0,872	- 0,023 - 0,013	0,008 0,02
	<i>Eschen-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Bingelkraut-Buchen</i>	0,013 0,872	- 0,02 - 0,02	- 0,0019 0,013
TOTSF	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,013 0,598	0,007 - 0,03	0,07 0,01
	<i>Bingelkraut-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Eschen-Buchen</i>	0,013 0,003	- 0,07 - 0,08	- 0,007 - 0,013
	<i>Eschen-Buchen</i>	<i>Bingelkraut-WLI-Buchen</i> <i>Bingelkraut-Buchen</i>	0,598 0,003	- 0,01 0,013	0,025 0,08

4.5.2.2 Vergleich der Strahlungsverhältnisse zwischen den Höhen- und Wuchsklassen

Der Zusammenhang zwischen Waldentwicklungsphase und Strahlungsangebot im Bestand spiegelt sich in der Betrachtung der räumlichen Verteilung der Strahlungsgrößen wider (Abb. 4.5-6). Die höchsten Medianwerte des TOTSF konnten mit 15 % bis 20 % des Freiflächenwertes in den waldentwicklungsmäßig am weitesten vorangeschrittenen Arealen der *Senke* und dem Mittelhang der Fläche *Hang* festgestellt werden, die Baumholzdimensionen aufweisen (Abb. 4.5-6, rechts; Abb. 4.2-9). Diese Waldflächen weisen lange, schlanke grünastfreie Stämme und relativ homogene, hoch angesetzte Kronen auf und sind dem beginnenden Baum-Hallenstadium zuzuordnen. In dieser räumlich eingrenzbaaren Waldentwicklungsphase sind im belaubten Zustand mit Medianwerten von 15 % bis 21 % des Freiflächenwertes hohe Anteile des DIRSF zu verzeichnen (Abb. 4.5-6, links), während die Medianwerte des DIFFSF mit Werten von 8 % bis 18,5 % keine spezifische Ausprägung haben (Abb. 4.5-6, Mitte). Die niedrigsten TOTSF-Werte lassen sich im Sommerhalbjahr räumlich den Arealen des noch nicht beendeten Disintegrations- und Formierungsstadiums, im Südwesten (und Osten) der *Kuppe* sowie dem Nord(Osten) des *Hangs* zuordnen, in denen stammzahlreiche Naturverjüngung und liegendes starkes Totholz dominieren. Zur Überprüfung dieser durch Interpolation im Geografischen Informationssystem sichtbar gemachten Unterschiede in der Strahlungsabschirmung der Waldentwicklungsphasen wurde jeder rasterbezogene Strahlungswert dem darüber stockenden Oberstand durch Verschneidung des Punktwertes mit dem Vegetationshöhenmodell zugeordnet.

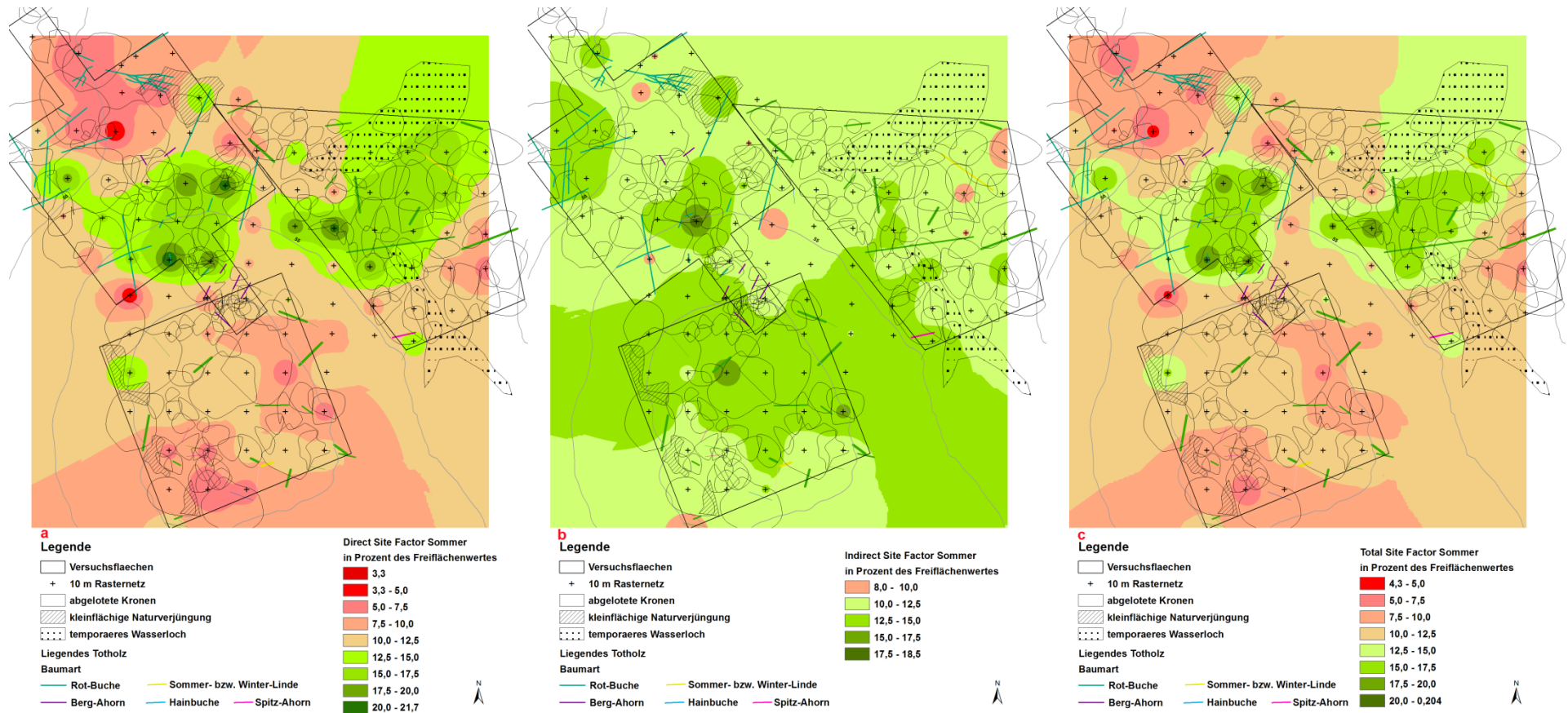


Abb. 4.5-6: Mittels räumlicher Interpolation aus je 95 hemisphärischen Einzelfotos in 0,35 m Höhe über dem Boden unter Nutzung der Software WinSCANOPY dargestellte prozentuale Anteile der Strahlungsgrößen (a) DIRSF, (b) DIFFSF und (c) TOTSF an der Freiflächenstrahlung im belaubten Sommerhalbjahr mit Darstellung der Kronenschirmflächen

Um den Einfluss der Exposition und der Hangneigung auf die Strahlungswerte zu minimieren, wurden nur die Strahlungswerte in den relativ ebenen Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Senke* herangezogen. In der Abb. 4.5-7 ist der Zusammenhang zwischen der Höhenklasse und den Medianen der Strahlungsgrößen²⁰ dargestellt. Sie nehmen mit wachsender Höhenklasse zu. Der Medianwert des DIFFSF unterscheidet sich nicht signifikant zwischen den Höhenklassen, er bewegt sich zwischen 12 % und 13,5 % des Freiflächenwertes. Bei den im Vegetationshöhenmodell (Abb. 4.2-9) sichtbaren Lücken handelt es sich um jene Bereiche im Südwesten und Osten der *Kuppe*, die dem noch nicht beendeten Disintegrations- und Formierungsstadium zuzuordnen sind. Bei der Betrachtung der Strahlungswerte der einzelnen Höhenklassen ist ein Trend in der Zunahme des DIRSF und TOTSF vom schwachen Stangenholz (10 m bis 12,5 m) bis zur Höhenklasse 20 m bis 22,5 m (Baumholz) erkennbar. Diese Höhenklassen bilden mit trupp- bis horstweisen Flächengrößen die neue Waldgeneration, die seit 1958 bzw. 1968 entstand.

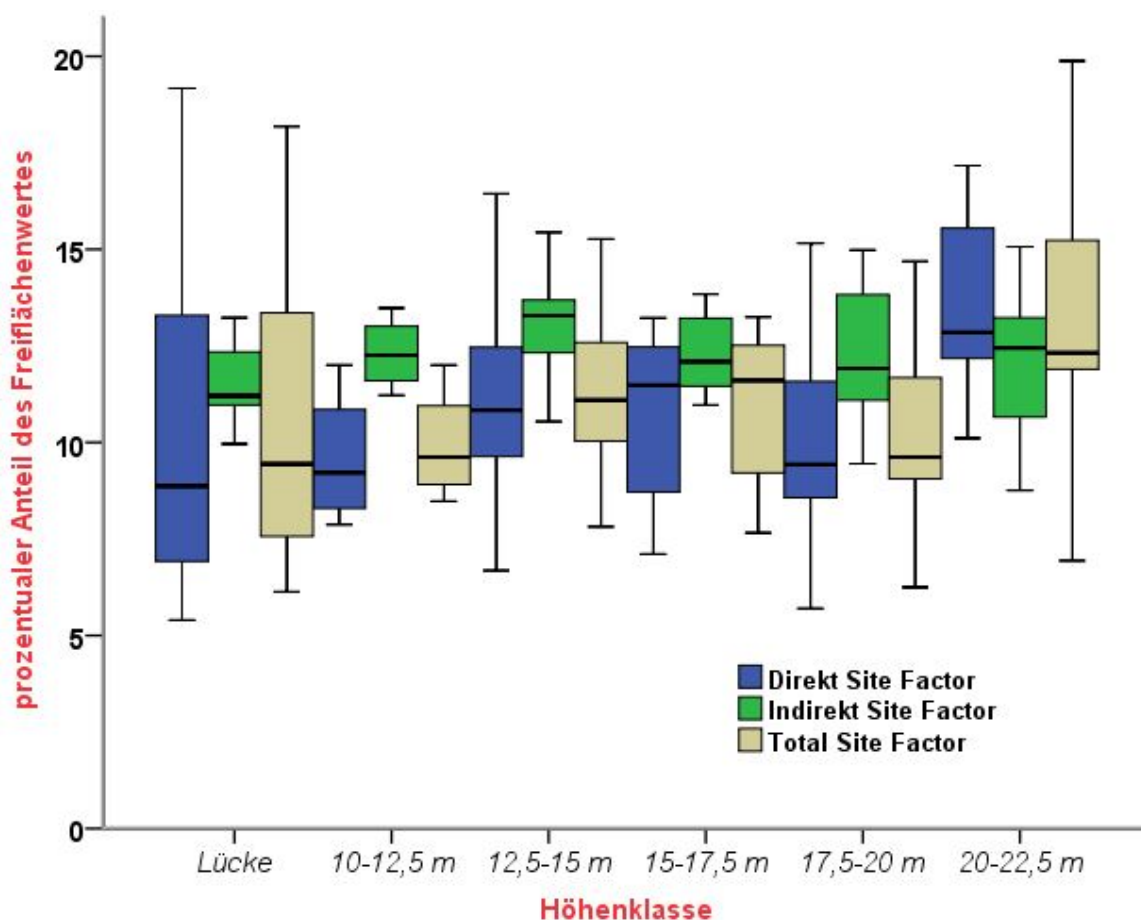


Abb. 4.5-7: Boxplots der Strahlungsstandortfaktoren im Bestand nach Höhenklassen der Bestockung

Die sich in der Abb. 4.5-7 andeutende Zunahme von DIRSF und TOTSF im Sommerhalbjahr mit der Zunahme des Höhenwachstums konnte durch die einfaktorielle Varianzanalyse nicht bestätigt werden (Tab. 4.5-7). Bei vorhandener Homogenität der Varianzen ist ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Höhenklasse und DIRSF ($P = 0,052$) und TOTSF

²⁰ Aufgrund zu geringer Beobachtungswerte konnten die Höhenklassen Aufwuchs, Anwuchs und Dichtung sowie die Höhenklassen oberhalb 22,5 m nicht berücksichtigt werden.

Factor ($P = 0,064$) gegeben, das erforderliche Signifikanzniveau wird jedoch nicht erreicht. Die Ursache hierfür könnte an der unterschiedlichen Stichprobengröße der Beobachtungswerte je Höhenstufe liegen.

Tab. 4.5-7: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Medianwerte der Strahlungsgrößen gruppiert nach Höhenklassen

		Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
DIRSF	zwischen den Gruppen	0,11	4	0,003	2,525	0,052
DIFFSF	zwischen den Gruppen	0,002	4	0,00	1,545	0,204
TOTSF	zwischen den Gruppen	0,008	4	0,002	2,384	0,064

Tab.4.5-8: Test auf Homogenität der Varianzen (Homogenität bei $P > 0,05$) gegeben.

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
DIRSF	zwischen den Gruppen	0,11	4	0,74
DIFFSF	zwischen den Gruppen	0,002	4	0,558
TOTSF	zwischen den Gruppen	0,008	4	0,696

Deshalb erfolgte eine zusätzliche Prüfung des Zusammenhangs Strahlungswerte und Höhenklasse mittels des nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test (Tab. 4.5-9).

Tab. 4.5-9: Ergebnis des nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test: Ermittlung der mittleren Ränge der Strahlungsgrößen nach Höhenklasse gruppiert

Strahlungsgröße	Höhenklasse	N	Mittlerer Rang
DIRSF	10–12,5 m	4	17,5
	12,5–15 m	12	26,33
	15–17,5 m 8	8	27,63
	17,5–20 m	14	20,64
	20–22,5 m	17	37,88
DIFFSF	10–12,5 m	4	26,88
	12,5–15 m	12	36,42
	15–17,5 m 8	8	26,38
	17,5–20 m	14	25,36
	20–22,5 m	17	25,26
TOTSF	10–12,5 m	4	17,75
	12,5–15 m	12	26,92
	15–17,5 m 8	8	27,38
	17,5–20 m	14	20,93
	20–22,5 m	17	37,29

Tab. 4.5-9 zeigt die Gruppengrößen und den gemittelten Rang der Gruppen. Während beim DIFFSF alle Höhenklassen einen mittleren Rang um 25–26 (bis auf die Höhenklasse 12,5 m–15 m) aufweisen, unterscheiden sich die gemittelten Ränge und damit die zentrale Tendenz der einzelnen Höhenklassen im DIRSF und TOTSF voneinander. Diese beobachteten Unterschiede im Direct und Total Site Factor sind signifikant (Tab. 4.5-10).

Tab. 4.5-10: Statistik für Kruskal-Wallis-Test (Gruppenvariable Höhenklasse), bestehende Signifikanz fett hervorgehoben

	DIRSF	DIFFSF	TOTSF
Chi-Quadrat	11,273	4,291	10,154
df	4	4	4
Asymptotische Signifikanz	0,024	0,368	0,038

Der aufgezeigte signifikante Zusammenhang zwischen der Höhenklasse (als Zuordnungskriterium der Waldentwicklungsphase) und der Höhe des Medianwertes des Direct und Total Site Factors erklärt die Differenziertheit der beiden Größen in den Abb. 4.5-6 (links) und (rechts). Eine statistische Prüfung der Zusammenhänge zwischen den drei Strahlungsgrößen und der Hangrichtung (Exposition) und der Hangneigung als mögliche Erklärungsursache des differenzierten DIFFSF ergab wegen zu geringer Flächengröße (zu wenige Beobachtungswerte für die südlichen, südwestlichen und westlichen Expositionen) und der gleichzeitigen Beeinflussung durch Höhenklassen keinen signifikanten Zusammenhang.

Kurze Zusammenfassung

- Im **Strahlungsfrühjahr** waren nur geringe, nicht signifikante Unterschiede in den Medianwerten des DIFFSF, DIRSF und TOTSF zwischen den drei Buchen-Ökosystemen festzustellen.
 - Die Medianwerte der drei Strahlungsgrößen bewegten sich zwischen 51 % und 54 % der Freiflächenwerte, die Gap Fraction variiert zwischen 31 % und 33 %.
 - Die Medianwerte des DIFFSF, DIRSF und TOTSF des *Bingelkraut-Buchenwaldes* waren im Vergleich niedriger und deren Streuung geringer als die der anderen beiden Buchenwald-Ökosysteme.
 - Die DIFFSF, DIRSF und TOTSF der einzelnen Höhenklassen sowie die Wuchsklassen (Stangenholz und Baumholz) unterschieden sich *nicht* signifikant voneinander
- Im **Sommerhalbjahr** gingen die Medianwerte der Strahlungsgrößen auf Werte zwischen 7 % und 13 % der Freiflächenwerte und die Gap Fraction auf 6 % bis 7 % zurück.
 - Die Mittelwerte des DIFFSF, DIRSF und TOTSF unterschieden sich signifikant zwischen den drei Buchen-Ökosystemen, nicht jedoch die Gap Fraction.
 - Der DIRSF und TOTSF unterschied sich signifikant zwischen dem *Bingelkraut-Buchenwald* und den beiden anderen Buchenmischwald-Ökosystemen.
 - Beim DIFFSF war ein signifikanter Unterschied zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald* festzustellen.
 - Die Medianwerte des DIRSF (7 % ²¹) und TOTSF (8 % ²¹) des *Bingelkraut-Buchenwaldes* waren signifikant niedriger als die der beiden Buchenmischwald-Ökosysteme.
 - Der DIFFSF-Wert des *Bingelkraut-Buchenwaldes* war nur unwesentlich geringer.
 - Signifikante Unterschiede bestanden zwischen den DIRSF- und TOTSF-Werten der einzelnen Höhenklassen, mit zunehmender Höhenklasse stiegen beide Werte.
 - Der Einfluss der Exposition und Hangneigung auf die Strahlungsgrößen konnte aufgrund fehlender SSO-, Süd- und SSW-Exposition nicht geklärt werden.

²¹ des Freiflächenwertes

4.5.3 Zusammenfassende Diskussion der Strahlungsschätzung

Die im Rahmen dieser Untersuchung erfolgte Strahlungsschätzung unter dem Kronendach in 0,35 m Höhe über dem Erdboden der drei Untersuchungsflächen wurde für zwei von vier Strahlungsjahreszeiten, *dem strahlungsreichen Frühjahr* und *dem durch Belaubung bedingten dunklen Sommer und Frühherbst*, durchgeführt (ERHARDT 1988). Die geschätzten Strahlungswerte bestätigen für beide Jahreszeiten die Feststellung, dass die räumliche Variation des Lichtfeldes im Sinne einer horizontalen Variation der Lichtstärke abhängig ist von der Höhe des Bestandes, der Messhöhe im Bestand, der Jahreszeit, dem Bestandesaufbau, der Außenhelligkeit, der Messperiode und der Größe des verwendeten Sensors. Am stärksten ist die Variation vom Bestandesaufbau abhängig. Lichtere Bestände verursachen eine stärkere Streuung der Lichtstärke am Boden (BRUNNER 1993). Die Hauptursachen für die hohe Strahlungsvariation des Bestandesaufbaus, die Baumartenzusammensetzung und die Waldentwicklungsphase (forstlich differenziert nach Höhenklasse und verallgemeinert in Wuchsklasse ausgedrückt), zeigen in den beiden untersuchten Strahlungsjahreszeiten einen unterschiedlich starken Einfluss:

1. Im strahlungsreichen Frühjahr konnten nur geringe, nicht signifikante Unterschiede in den Medianwerten der drei beobachteten Strahlungsgrößen zwischen den drei von der Buche in unterschiedlicher Weise beherrschten Ökosystemen festgestellt werden. Mit 51 % bis 54 % der entsprechenden Freiflächenwerte liegen die Mediane über den mit etwa 40 % der entsprechenden Freiflächenwerte als Monatsmittel April für einen collinen Kalkbuchenwald im Solling festgestellten Werten (ERHARDT 1988, 38). Der Einfluss der Höhenklasse bzw. Wuchsklasse auf die drei gemessenen Strahlungsgrößen im Strahlungsfrühjahr ist ebenfalls gering und nicht signifikant. Der Medianwert für die diffuse Strahlung ist mit 55 % der Freiflächenstrahlung in beiden Wuchsklassen gleich hoch. Auffallend für das *Bingelkraut-Buchenwaldökosystem*, ist neben den stets etwas geringeren Medianwerten der einzelnen Strahlungsgrößen, eine vergleichsweise sehr geringe Streuung. Diese geringe Streuung der Strahlung im Frühjahr gilt auch für die ganzjährige Strahlungssituation als Standortsfaktor auf dem Nordwest-*Hang* (im Unterschied zu den Strahlungssituationen auf der *Kuppe* und der *Senke*). Sie zeigt die im Flächenvergleich ganzjährig geringere Energieeinstrahlung. Damit wird die interspezifische Konkurrenzkraft der Buche im leicht subkontinental getönten Klima (SCAMONI 1957, 55 ff.) positiv beeinflusst, die zu einem geschlossenen Kronendach aus Buche und Berg-Ahorn sowie unterständigen Berg-Ulme am Mittel- und Unter-*Hang* führt und sich in den Kühlezeigern der Vegetation manifestiert. Bei der Betrachtung des Einflusses der Höhen- bzw. Wuchsklassen auf die geschätzten Strahlungsgrößen im Strahlungsfrühjahr ist ein deutlich geringere Streuung im DIFFSF (und damit in der PAR Strahlung) in der Wuchsklasse *Baumholz* im Vergleich zur Wuchsklasse *Stangenholz* zu beobachten, die die Strahlungssituation unter den schlanken jungen Baumhölzern mit hoch angesetzter Krone in der *Raumeroberungsphase* gut charakterisiert (OTTO 2002, 651). Insofern ist REES (1999, 48 ff.) zuzustimmen, der feststellte, dass der Median und Quartil bzw. Dezil in der Regel geeignetere Maßzahlen als arithmetische Mittelwerte zur Beschreibung der mittleren Einstrahlung und ihrer Variabilität am Waldboden und infolge der genaueren Wiedergabe der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Ressourcen dynamischer Prozesse in Wäldern besser erklärbar sind. Es liegen nur sehr wenige Strahlungsuntersuchungen von Buchenwäldern im Strahlungsfrühjahr vor.

2. In der belaubten Phase der dunklen Sommer- und Frühherbststrahlungsjahreszeit gehen die Strahlungswerte am Waldboden stark zurück. Umfangreiche Strahlungsuntersuchungen mit dem Focus auf die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) sind hierzu in den collinen Buchenwäldern des Solling und des Göttinger Waldes durchgeführt worden, die jedoch zumeist nur Angaben zum Mittelwert der PAR enthalten (Tab. 4.5-11).

Tab. 4.5-11: Strahlungsuntersuchungen zur photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) in collinen und montanen Buchenwäldern (verändert und erweitert nach REES 1999, 126)

Quelle	Transmittierte PAR (%)		
	Mittelwert	Minimum	Maximum
Trapp (1938)	5	–	–
Ehrhard (1988)	3,7	–	–
Gönnert (1989)	3,4	1,2	5,8
Biederbick (1991)	2,25	1,7	3,0
Brünn (1992)	4,0	–	–
Heinken (1995)	2,7	0,5	5,5
<i>Sollingprojekt</i>			
Eber (1972)	4,4–6,0	–	–
Reichardt (1981)	1,8	1,1	2,9
Schenk et al. (1989)	< 5	–	–
Thiel (1990)	2–7	–	–
Kleikamp (1991)	6,0	2,9	8,4
Schulte (1993)	3–5	–	–
Rees (1999)	6,0	1,8	9,5

Die beobachteten Mittelwerte der PAR-Strahlung in den collinen Buchenwäldern bewegen sich übereinstimmend zwischen 2 % und 7 % der Freiflächenwerte (Tab. 4.5-11). Es handelt sich bei den Beobachtungsobjekten um einschichtige, vollbestockte Buchenbestände mit teilweise Mischbaumartenanteilen (Gemeiner Fichte, Berg-Ahorn). Die relative Beleuchtungsstärke von unter 7 % der Freiflächenstrahlung ist für das Keimen und den Anwuchs, aber nicht für das erfolgreiche Aufwachsen einer Buchenverjüngung im Unterstand ausreichend. Aus künstlichen Beschattungsexperimenten ist bekannt, dass ein- bis dreijährige Buchen unterhalb von 20 % relativer Beleuchtungsstärke mit einer Reduktion des Höhenwachstums reagieren (BURSCHEL & HUSS 1964). Die von BURSCHEL und SCHMALZ (1965, 200 ff.) gezogene Grenze von 10 % relativer Beleuchtungsstärke, bei der mit Kümern und möglicherweise Vergehen der Jungbuchen zu rechnen ist, wird durch neuere Untersuchungen bestätigt, die eine deutliche Zunahme des Abweichungswinkels des Buchenleittriebs von der Lotrechten unter 10 % des DIFFSF feststellten (GRALLA ET AL. 1995, zit. nach WAGNER ET AL. 1997, 21 f.). Deshalb seien ergänzend zu den Strahlungsmessungen in vollbestockten Buchenbeständen die Untersuchungsergebnisse von Strahlungsmessungen (relative Beleuchtungsstärke) in Lücken von Buchenwäldern wiedergegeben (VON LÜPKE 1995, Tab. 4.5-12).

Tab. 4.5-12: Relative Beleuchtungsstärke in Buchenlücken in Abhängigkeit der Lückengröße bei einer Bestandeshöhe von 30 m–36 m (verändert nach VON LÜPKE 1995, 141 ff.)

Durchmesser der Lücke	Lückengröße [m ²]	relative Beleuchtungsstärke [%]
17 m	250	12–15
25 m	500	18–20
50 m	2000	45–60

WAGNER ET AL. (1997, 20 f.) konnte zudem bei 7-jährigen Buchen aus Pflanzung bei Erhöhung des DIFFSF von 14 % auf 23 % der Freiflächenstrahlung in den ersten vier Vegetationsperioden einen signifikanten Durchmesserzuwachs feststellen. Unter den Strahlungsuntersuchungen der Tab. 4.5-11 ist die von BIEDERBICK (1991) hervorzuheben. Er untersuchte erstmals im collinen Buchenwaldareal den Strahlungshaushalt unterschiedlich exponierter Kalkbuchenwälder, einen WSW-exponierten Seggen-Kalkbuchenwald im Vergleich zum Strahlungshaushalt eines nordorientierten Platterbsen-Buchenwaldes. Die von ihm beobachtete relative Beleuchtungsstärke (DIFFSF²²) bewegte sich im SSW exponierten Seggen-Buchenwald mit 2 % bis über 4 % des Freiflächenlichtes um 50 % (strahlungsarme, bewölkte Wetterlage) bis 115 % (strahlungsreiches Wetter) über den vergleichbaren Werten des nordexponierten Platterbsen-Buchenwaldes (1,3 % bis 2 %) (BIEDERBICK 1991, 84 ff.). Ursächlich ist hierfür die expositionsbedingte unterschiedliche Einstrahlungsmöglichkeit der Sonnenflecken, da die WSW-Exposition eine deutlich längere Besonnung des Kronendaches erlaubt und durch die starke Inklination des Standortes ein phasenweise sehr steiler Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung gegeben ist, was zu einem relativ höheren Durchdringungsgrad der direkten Einstrahlung (DIRSF) durch die Kronenschicht führt. Hingegen resultiert die Beleuchtungsstärke im nordexponierten (ab sonnigen) Platterbsen-Kalkbuchenwald bei allen Wittertypen vorwiegend aus der diffusen Himmelsstrahlung (BIEDERBICK 1991, 86). Neuere Untersuchungen in Kalkbuchenwäldern auf gegenüberliegenden Hängen (NO- und SW-Exposition) der Schwäbischen Alb arbeiteten den entscheidenden Einfluss der Exposition auf die Herausbildung spezifischer Mikrokimate heraus, die durch ihre jeweiligen Strahlungs-, Wärme und Wasserhaushalte geprägt sind (HOLST ET. AL. 2001, 10 ff.). ANDERS (1974) erarbeitete für colline Regionen Ostdeutschlands Schätzgrößen der relativen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von Hangneigung und Hangrichtung in Fichtenwäldern.

Über den Strahlungshaushalt in Buchenwäldern des Nordostdeutschen Tieflandes liegen nur wenige Untersuchungen vor, die sich auf die relative Beleuchtungsstärke bzw. die diffuse Strahlung beschränken. HOFMANN (1962, 102 ff.) ermittelte für einen Traubeneichen-Buchenwald im Nordostdeutschen Tiefland auf einem Nordhang in 0,5 m Höhe einen Mittelwert der relativen Beleuchtungsstärke (PAR bzw. DIFFSF) von 4,5 % bis 4,9 % der Freiflächenstrahlung. In zwei Untersuchungsflächen eines Perlgras-Buchenwaldes, die mit jeweils sechs bzw. sieben quadratischen Rastern zur Messung der Variation der Beleuchtungsstärke untersetzt wurden, sind über der aufgelaufenen

²² Die relative Beleuchtungsstärke, gemessen mit einem Handluxmeter bei einer komplett einheitlichen Bewölkung, ist mit der diffusen Strahlung (DIFFSF) identisch (WAGNER 1994). Die diffuse Strahlung (DIFFSF) weist eine gute Übereinstimmung mit der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR in %) auf (BRUNNER 1993).

Buchennaturverjüngung in unterschiedlicher Höhe über NHN unter einem unregelmäßigen Buchenschirm rasterbezogene Mittelwerte der PAR-Strahlung zwischen 2,5 % und 16,5 % der Freiflächenbeleuchtungsstärke festgestellt worden (EISMANN 1994, 70 ff.). Im gleichen Perlgras-Buchenwald konnten fünf Jahre später Mittelwerte des DIFFSF von 1,8 % bis 8,3 % des Freiflächenwertes beobachtet werden, wobei als Besonderheit ein lockerer Schirm von Altbuchen in den Untersuchungsflächen regelmäßig verteilt vorhanden war (TABAKU 1999, 36 ff.). Als Tendenz konnte im *Perlgras-Buchenwald* eine Abnahme der diffusen Strahlung vom einschichtigen Altholz über die überschirmte Jungwuchsfläche, die Dickung, das Gertenholz bis hin zum extrem strahlungsarmen Stangenholz festgestellt werden. TABAKU (1999) schlussfolgerte deshalb, „dass die Strahlungsverhältnisse im Bestandesinneren nicht nur von der horizontalen Struktur des Bestandes, sondern auch ganz wesentlich von dessen vertikaler Struktur bestimmt werden“ (TABAKU 1999, 46). In acht polnischen Tieflandbuchenwäldern konnten Mittelwerte der DIFFSF von 13 % bis 36 % (im Mittel 17 %) der Freiflächenstrahlung festgestellt werden (CZARKOWSKI 2006, 22). Eine gleichmäßige Auflichtung unterschiedlicher Intensität war wenige Jahre zuvor in allen Beständen zur Förderung der Naturverjüngung erfolgt (CZARKOWSKI 2016, mdl. Mitteilung).

In der vorliegenden Untersuchung konnten signifikante Unterschiede zwischen den geschätzten Strahlungsgrößen des Direct (DIRSF), Indirect (DIFFSF) und Total Site Factors (TOTSF) der drei Untersuchungsflächen herausgearbeitet werden. Die Ursachen für diese Strahlungsunterschiede bestehen vor allem in der unterschiedlichen:

1. Baumartenzusammensetzung:

(Buche, Berg-Ahorn, Berg-Ulme im *Bingelkraut-Buchenwald*; Winter- und Sommer-Linde, Buche, Hainbuche, Esche, Spitz- und Berg-Ahorn im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* sowie Esche, Rot-Erle, Buche, Winter- und Sommer-Linde, Spitz- und Berg-Ahorn, Berg-Ulme im *Eschen-Buchenwald*). Durch die Mischung von nur Schattbaumarten (*Bingelkraut-Buchenwald*) oder aber Licht, Halbschatt- und Schattbaumarten (*Eschen-Buchenwald* und *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald*) entstanden unterschiedliche Variationen der horizontalen Lichtstärke. Dies äußert sich in den signifikanten Unterschieden der Medianwerte (sowie vergleichsweise engeren Abständen zwischen unteren und oberen Quantils) des Direct und Total Site Factors zwischen dem *Bingelkraut-Buchenwald* (7 % bzw. 8 % der Freiflächenwerte) einerseits und den beiden anderen Waldökosystemen, die sich mit 11 % bzw. 12 % beim DIRSF sowie 13 % und 12 % beim TOTSF der jeweiligen Freiflächenwerte nicht signifikant voneinander unterscheiden.

2. Lage und Exposition der Untersuchungsflächen, die zur Ausbildung dieser drei Waldökosysteme führte. So beträgt die Neigung des Areals des *Bingelkraut-Buchenwaldes* bei einer WNW-Exposition des Mittel- und Unter-*Hangs* zwischen sechs und 15 Grad, die des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldes* auf Ober-*Hang* (hier auch mit WNW-Exposition) und der *Kuppe* und des *Eschen-Buchenwaldes* in der *Senke* (beide ohne eindeutige Expositionsbindung) überwiegend deutlich kleiner als zehn Grad. Wie schon BIEDERBICK (1991, 86) feststellte, resultiert die Beleuchtungsstärke auf einem absonnigen *Hang* (in diesen Untersuchungen WNW-Exposition) überwiegend aus der DIFFSF. Die geschätzten DIFFSF Werte sind mit einem Medianwert von **um die 12 %** der Freiflächenstrahlung in etwa gleich hoch

und liegen mit Ausnahme der Untersuchungsergebnisse von EISMANN (1994) und CZARKOWSKI (2016) über den bisher in der Literatur beobachteten Werten. Sie entsprechen in etwa den von v. LÜPKE (1995) für Lücken kleiner 250 m² Fläche in 30–36 m hohen collinen Buchenwäldern beobachteten (Tab. 4.5-12). Signifikante Unterschiede im DIFFSF bestehen nur zwischen den Werten des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldes* und denen des *Eschen-Buchenwaldes*. Ursächlich hierfür dürfte die im Vergleich größere Heterogenität der rasterbezogen geschätzten DIFFSF-Strahlungswerte im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* sein.

3. Höhen- bzw. Wuchsklassen

In der vorliegenden Untersuchung konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Medianwerten des DIRSF und des TOTSF und der Höhenklasse in den Buchenwaldökosystemen beobachtet werden. Hierzu wurden ausschließlich die Strahlungswerte in den Flächen *Hang* und *Kuppe* betrachtet, um die Einflüsse der Exposition und der Hangneigung gering zu halten.

Der Medianwert beider Strahlungsgrößen wächst tendenziell mit zunehmender Höhenklasse im Wertebereich von 10 m bis 22,5 m. Ob es sich um einen direkten Zusammenhang zwischen den Höhenklassen und den untersuchten Strahlungsfaktoren handelt oder aber der Zusammenhang vielmehr zwischen der (mit der Bestandeshöhe korrelierten) grünastfreien Stammlänge und dem DIRSF und TOTSF besteht, konnte aufgrund der gewählten Methodik unter Verwendung des Vegetationshöhenmodells nicht geklärt werden. NOACK (2014, 236) stellte in einer ca. 160 Probeflächen umfassenden Studie in mit Traubeneichen vorangebauten Kiefernforsten durch Korrelationsanalyse einen engen Zusammenhang zwischen dem Biomassewachstum der vorangebauten Traubeneichen und dem Quotienten aus Überschirmungsprozent und der grünastfreien Stammlänge des Kiefernschirmes fest. PECK (2004) arbeitete in ihren mikroklimatischen Untersuchungen von Buchenwäldern auf der Schwäbischen Alb den Einfluss der Kronenschirmdichte heraus. Der in der Literatur beschriebene signifikante Unterschied im DIFFSF der Wuchsklassen im *Perlgras-Buchenwald* ist wegen fehlender bzw. zu geringer Beobachtungswerte für die Klassen Lücke, Anwuchs, Jungwuchs und Dickung nicht geprüft worden (TABAKU 1999, 47).

Aufgrund der eingeschränkten Flächenausdehnung, insbesondere die unzureichend repräsentierte Süd- und Südwestexponiertheit der Waldstandorte in den drei Untersuchungsflächen, konnte der Einfluss der Exposition und Hangneigung auf die drei Strahlungsgrößen nicht weiter betrachtet werden. Insgesamt bestätigen die Untersuchungen zur Lichtökologie unter dem Schirm die jahreszeitlichen Differenzierungen der am Boden eingestrahlten Energie nach Exposition, Bestandesdichte, ökosystemabhängiger Baumartenmischung und im weitesten Sinne der Bestandeshöhe.

4.6. Ergebnisse der baumartenspezifischen genetischen Untersuchungen

4.6.1 Genetische Untersuchungen Buche

Von den eingesandten 200 Buchenblattproben konnten 199 erfolgreich genetisch untersucht werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Genanalysen präsentiert (Fussi 2014). Die Zusammensetzung der 199 analysierten Buchenproben ist Tab. 4.6-1 entnehmbar.

4.6.1.1 Genetische Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen

Die genetischen Diversitätswerte der Buchen in den drei Untersuchungsflächen (Anzahl der Allele [Na], mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne], prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [Ho] und erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]) liegen sehr nah beieinander (Tab. 4.6-1).

Tab. 4.6-1: Genetische Diversitätswerte (Mittelwerte) der drei Untersuchungsflächen anhand von zehn Mikrosatellitengenen

Fläche	Proben-anzahl	Anzahl der Allele [Na]	mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]	Anzahl der privaten Allele [Np]	prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [Ho]	erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]
Kuppe	42	8,3	4,9	0,5	69,5	72,9
Hang	73	9,0	4,6	0,6	67,5	70,3
Senke	84	9,5	4,5	0,7	70,8	71,8

Infolgedessen ist der genetische Abstand nach NEI (1972), der ein Maß für die Verteilung der Allele in den zu vergleichenden Kollektiven als berechnete Allelhäufigkeiten darstellt, zwischen den drei untersuchten Buchenwaldflächen sehr gering. Er bewegt sich zwischen 0,012 und 0,019 (Tab. 4.6-2).

Tab. 4.6-2: Genetischer Abstand zwischen den drei Buchenflächen (NEI 1972)

Fläche Waldökosystem	Senke Eschen-Buchenwald	Hang Bingelkraut-WLI-Buchen/ Bingelkraut-Buchenwald
Hang Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald Bingelkraut-Buchenwald	0,012	–
Kuppe Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald	0,019	0,014

4.6.1.2 Genetische Unterschiede zwischen den Durchmesserklassen

Auch zwischen den vier verschiedenen Durchmesserklassen (Jungwuchs bis 40 mm; Stangenholz (41 mm bis 200 mm); junges (201 mm bis 400 mm) und mittleres bis starkes Baumholz (größer 400 mm)) lassen sich nur geringe Unterschiede in den Diversitätswerten feststellen (Tab. 4.6-3). Die Durchmesserklasse 41 mm bis 200 mm (Stangenholz) weist eine geringfügig höhere Anzahl von Allelen ([Na]-Wert) und eine höhere Anzahl von privaten

Allelen ([Np]-Wert) auf. Ein Blick auf die unterschiedlichen Probenzahlen der Durchmesserklassen und ihren Ausprägungswerten in diesen beiden Diversitätskriterien zeigt den engen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Individuen in den einzelnen Gruppen und der Anzahl der Allele [Ne] bzw. der privaten Allele [Np] (Tab. 4.6-3).

Tab. 4.6-3: Genetische Diversitätswerte der vier Durchmesserklassen der Buche anhand von zehn Mikrosatellitengenenorten

Durchmesser- klasse	Probenzahl	Anzahl der Allele [Na]	mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]	Anzahl der privaten Allele [Np]	prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [Ho]	erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]
< = 40 mm	46	8,7	5,09	0,3	68,9	72,8
50–200 mm	103	9,7	4,8	0,9	70,1	72,6
200–400 mm	32	7,9	4,8	0,5	69,1	71,3
> 400mm	18	6,9	4,2	0	66,7	69,6

Der genetische Abstand nach NEI (1972) zwischen den verschiedenen Durchmesserklassen der Buche ist sehr gering (Tab. 4.6-4). Er bewegt sich zwischen 0,03 zwischen dem Stangenholz und dem jungen Baumholz als Minimum und 0,066 zwischen dem Jungwuchs und dem mittleren bis starken Baumholz als Maximumwert.

Tab. 4.6-4: Genetischer Abstand zwischen den vier Klassen (NEI 1972)

Durchmesserklasse	< = 40 mm	41 bis 200 mm	201 bis 400 mm
41 bis 200 mm	0,037	–	
201 bis 400 mm	0,058	0,030	–
> 400 mm	0,066	0,035	0,060

Der Anteil heterozygoter Allele an den zehn untersuchten Mikrosatellitenorten schwankt bei den untersuchten Buchen zwischen 3 von 10 (Minimum) und 10 von 10 (Maximum) (Abb. 4.6-1).

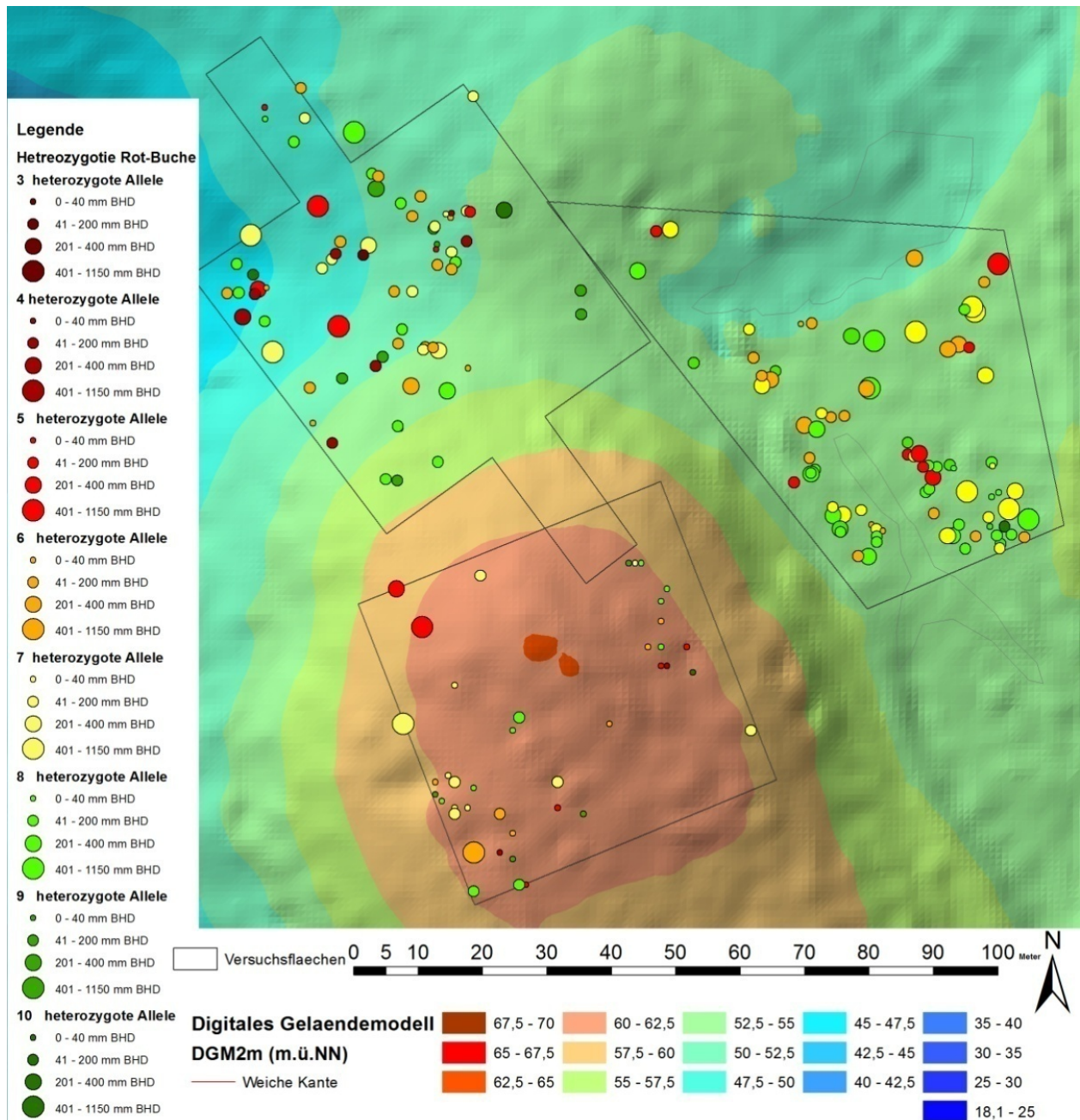


Abb.4.6-1: Heterozygote Allelhäufigkeiten an den untersuchten zehn Mikrosatellitenorten der Baumart Buche, skaliert nach der Größe der Brustdurchmesser

Der in der Abbildung an dem gehäufteren Auftreten der rötlichen Kreispunkte im Vergleich zur *Kuppe* erkennbare höhere Anteil homozygoter Allele der Buchen im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* und im *Bingelkraut-Buchenwaldareal* des *Hangs* ist in der jeweils doppelt so hohen Probenzahl im Vergleich zum *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* begründet, da der prozentuale Anteil heterozygoter Individuen [Ho]-Wert fast auf konstantem Niveau zwischen den drei Flächen liegt (Tab. 4.6-1 und Tab. 4.6-3). Die Heterozygotiewerte der Buche treten geklumpt in einer typischen Ausdehnung von 20 m bis 30 m auf (Abb. 4.6-2).

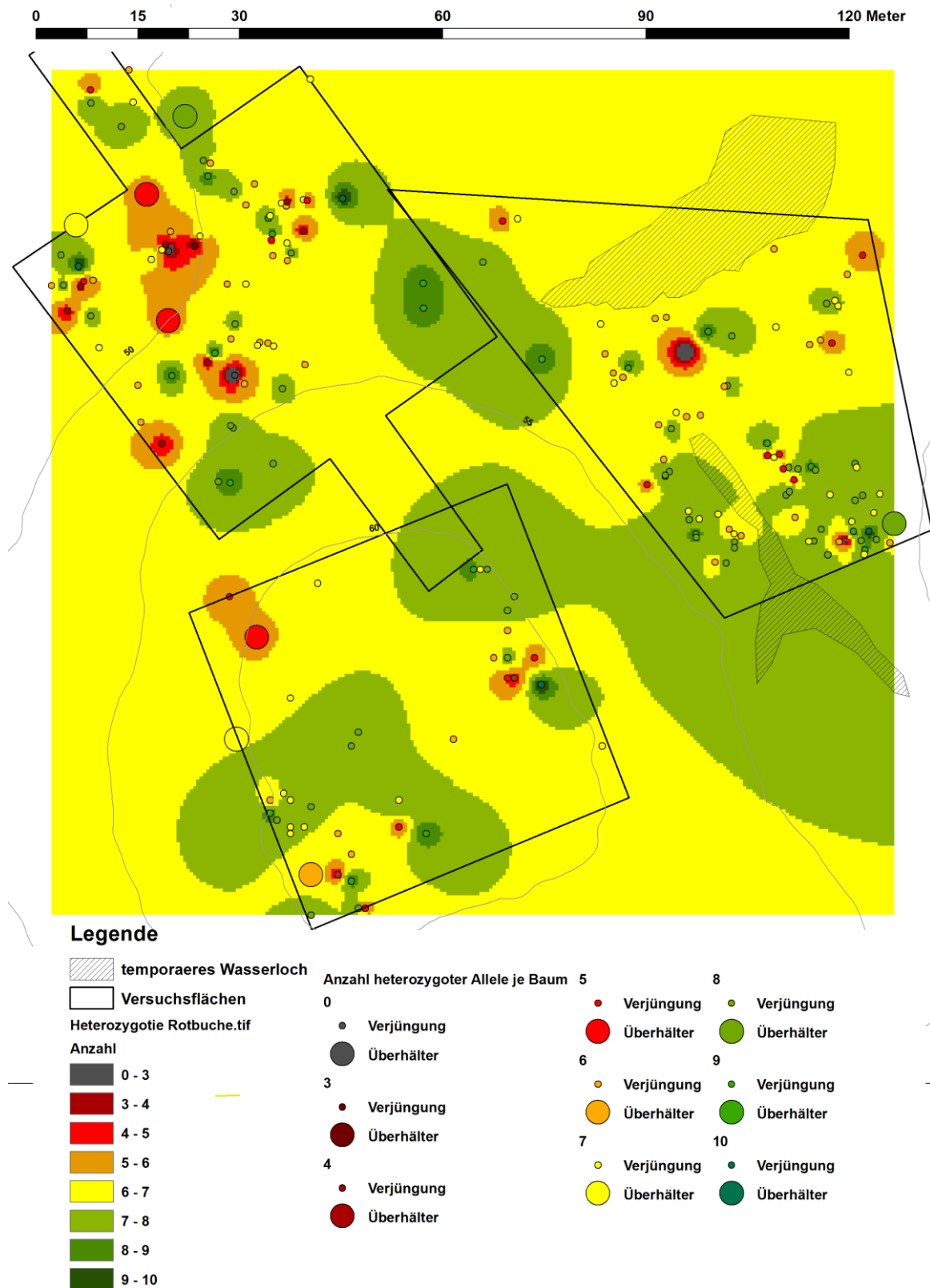


Abb. 4.6-2: Darstellung der mittels IDW interpolierten Heterozygotiewerte der Buchen

4.6.1.3 Analyse seltener und privater Allele an den 10 Mikrosatellitengenenorten

Die Anzahl seltener Allele [5 %], d. h., Allele mit einer Häufigkeit von maximal 5 % an den zehn untersuchten Mikrosatellitengenenorten, ist zwischen den Untersuchungsflächen und den Durchmesserklassen annähernd gleich verteilt, Abb. 4.6-3.

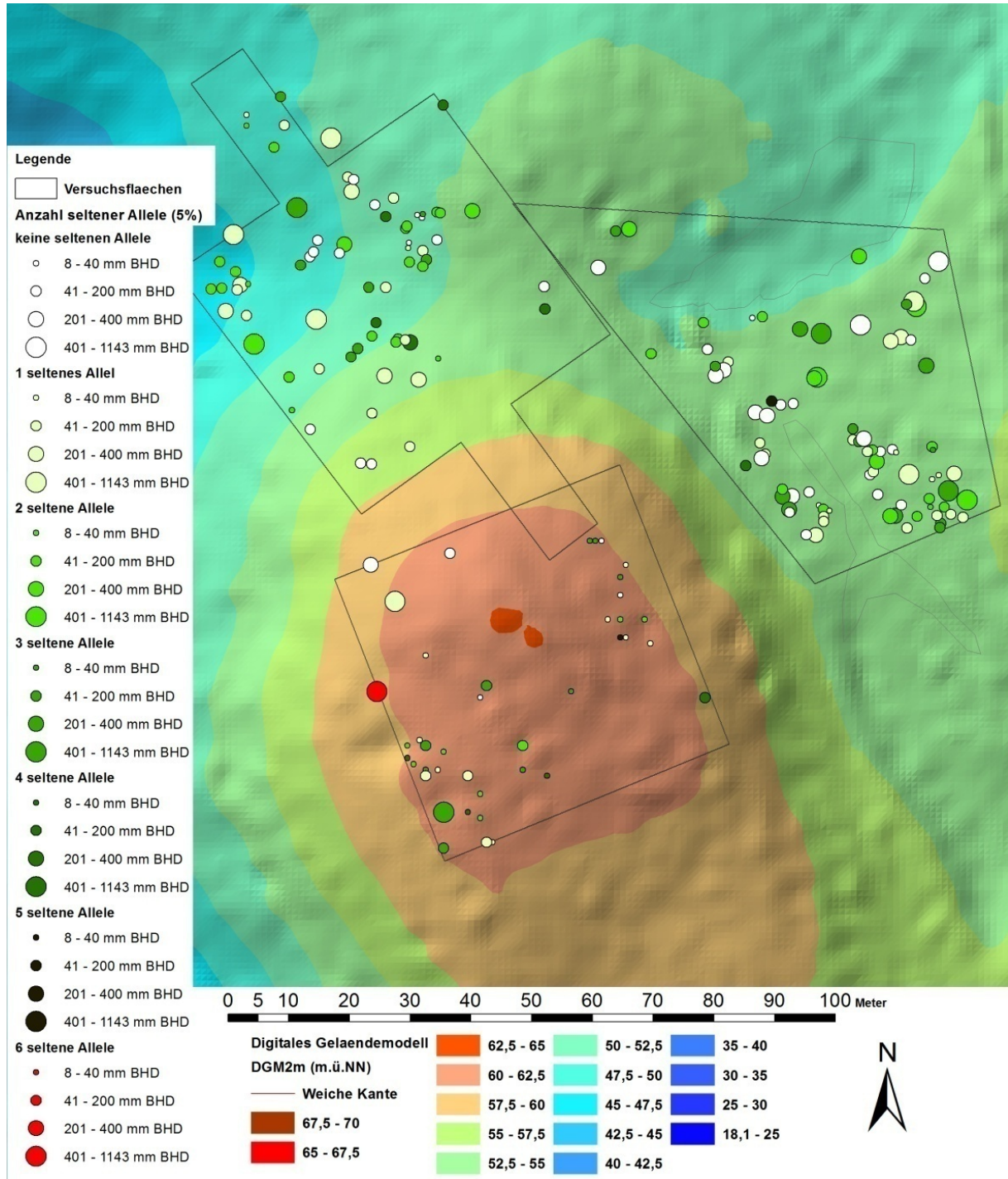


Abb. 4.6-3: Buchen mit seltenen Allelen (5 %) an den untersuchten zehn Mikrosatellitenorten, skaliert nach der Größe der Brustdurchmesser

Je einmal im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* im Stangenholz und einmal im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* in der Jungwuchsklasse ist eine Buche mit fünf

seltene Allelen [5 %] vorhanden. Buche Nummer 25 (starkes Baumholz) am Westrand des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldes* der *Kuppe* besitzt mit sechs seltenen Allelen [5 %] gegenwärtig die größte Anzahl. Die Gesamtzahl der privaten Allele, d. h. Allele, die nur einmal in der untersuchten Buchengesamtpopulation vorkommen, ist zwischen den beiden Waldökosystemen *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und *Eschen-Buchenwald* annähernd gleich verteilt und auf die Jungwuchs-, Stangenholz- und schwache Baumholzdimension beschränkt (Tab. 4.6-3 und Abb. 4.6-4).

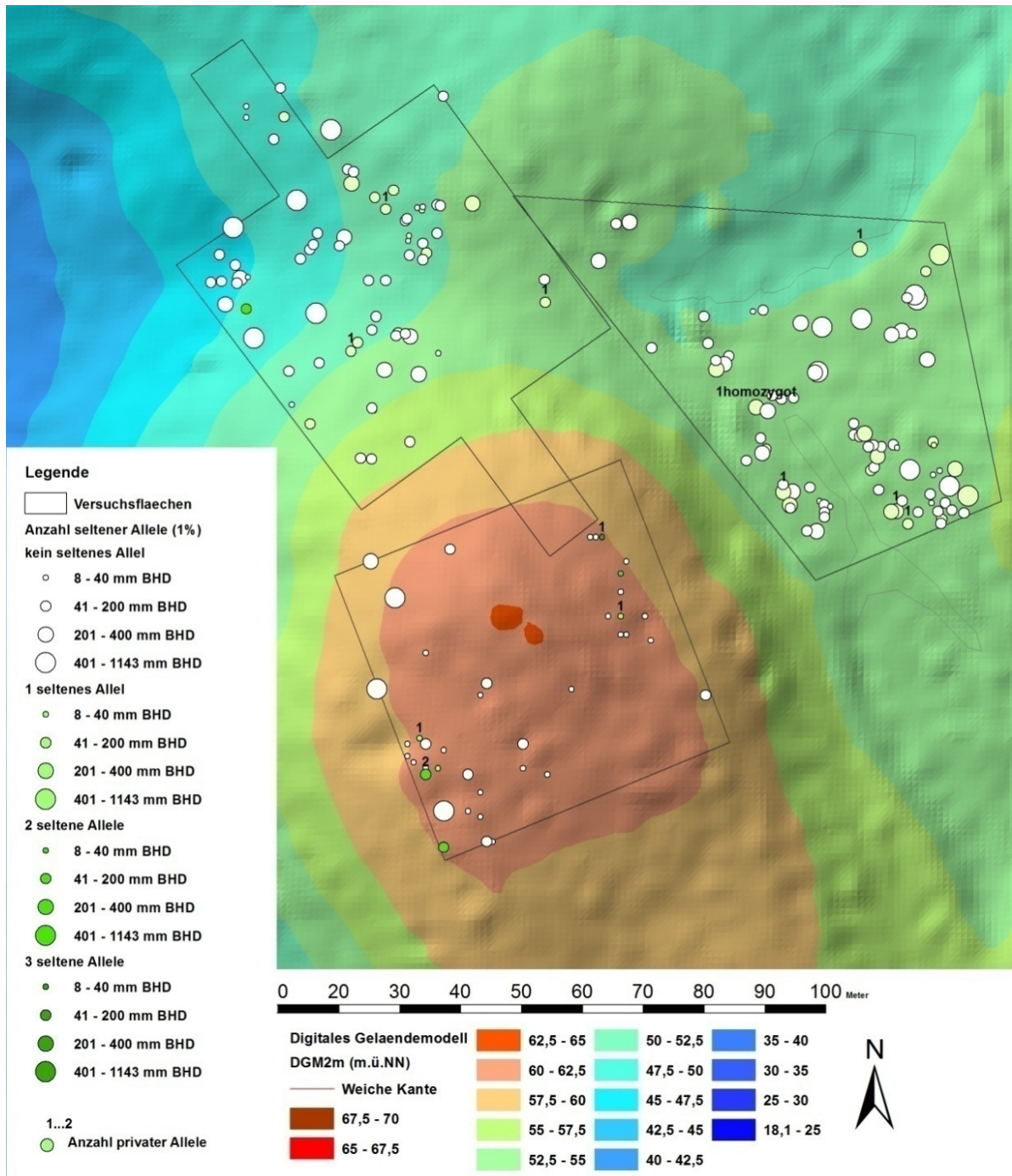


Abb. 4.6-4: Buchen mit seltenen Allelen (1 %) und privaten Allelen an den untersuchten zehn Mikrosatellitenorten, skaliert nach der Größe der Brustdurchmesser

Fünf private Allele sind an den zehn Mikrosatellitengenorten der Buchen im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* (davon ein homozygoten Allel) und fünf private Allele an vier Buchen im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der Fläche *Kuppe* sowie zwei private Allele im Teilareal des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldes* auf dem Mittel- bis Ober-*Hang* beobachtet worden. Mit zwei privaten Allelen an einem Genort der Buche wurde im Südwesten des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldes* der *Kuppe* der höchste Wert festgestellt. An den Buchen des *Bingelkraut-Buchenwald* des *Hangs* wurde nur ein privates Allel beobachtet. Das Vorkommen der seltenen Allele [1 %], d. h. jener Allele, die höchstens mit 1 % an den zehn Mikrosatellitengenorten der 199 Buchen vorkommen, verteilt sich über alle Durchmesserklassen der Buchen. Die höchsten Anteile seltener Allele [1 %] pro Buchenindividuum kommen jedoch nur in den Jungwuchs- und Stangenholzklassen vor (Abb. 4.6-4). Während im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* nur Buchen mit *einem* seltenen Allel [1 %] vorkommen, befindet sich im *Bingelkraut-Buchenwald* des *Hangs* neben diesen eine Buche mit *zwei* seltenen Allelen [1 %] in der Naturverjüngung. Im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* konnte in der Naturverjüngung neben mehreren Buchen mit *einem* seltenen Allel [1 %], eine Buche mit *zwei* seltenen Allelen [1 %], auch eine Buche mit *drei* seltenen Allelen [1 %] festgestellt werden, wobei eines der seltenen Allele [1 %] der beiden zuletzt genannten Buchen zugleich ein privates Allel darstellt. Trotz der deutlich verringerten Probenzahl des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldareals* der *Kuppe* ist die hier pro Mikrosatellitengenort beobachtete höhere durchschnittliche Ausstattung der Buchen mit seltenen und privaten Allelen bemerkenswert (Tab. 4.6-5).

Tab. 4.6-5: Darstellung der flächen- und ökosystembezogenen Anzahl seltener und privater Allele

Fläche Waldökosystem	Proben- anzahl	Anzahl seltener Allele [5 %]	Anzahl seltener Allele [1 %]	Anzahl privater Allele
Kuppe <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	42	90	12	5
Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i> <i>Bingelkraut-Buchenwald</i>	73	115	17	4
Senke <i>Eschen-Buchenwald</i>	84	114	18	5

Während für das im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* festgestellte erhöhte Vorkommen privater und seltener Allele [1 %] das im Vergleich zu den beiden anderen Untersuchungsflächen jüngere Bestandesalter der Buchen auf der *Kuppe* (Grundflächenmittelstamm von 8 cm und 11 m Höhe des Buchenunterstandes, Tabelle 4.2-4) verantwortlich zu sein scheint (begründet in der Tatsache, dass der Prozess der Stammzahlselektion hier noch nicht beendet ist), ist das erhöhte Vorkommen seltener Allele mit 5 % Anteil an der Gesamtpopulation [5 %] hierdurch nicht erklärbar.

4.6.2 Genetische Untersuchungen an Sommer- und Winter-Linde

Insgesamt wurden in den drei Untersuchungsflächen 69 lebende Individuen der Winter-Linde und 47 der Sommer-Linde anhand morphologischer Merkmale festgestellt. Sie sind in den drei Untersuchungsflächen vorkommenden Waldökosystemen mit unterschiedlichen Mengenanteilen vertreten (Tab. 4.6-6):

Tab. 4.6-6: Absolute Bestandeszahlen der anteiligen Lindenbestockung (genetische Artzuordnung)

Fläche <i>Waldökosystem</i>	Winter-Linden				Sommer-Linden			
	N absolut	davon Zwiesel	für Beprobung zu kleiner D _{1,3}	Σ Genproben	N absolut	davon Zwiesel	für Beprobung zu kleiner D _{1,3}	Σ Genproben
Kuppe <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	48	7	5	36	17	2	3	12
Senke <i>Eschen-Buchenwald</i>	17	3	–	14	27	9	–	18
Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	2 ²³	–	2	–	5	–	–	5
Σ	67	(-)10	(-)7	50	49	(-)11	(-)3	35

Im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* sind die beiden Baumarten annähernd gleichverteilt, während im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* die Winter-Linde den etwa dreifachen Stammanteil der Sommer-Linde besitzt. Hingegen ist im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* des Oberhanges der Fläche *Hang* bei insgesamt sehr geringen Stammzahlen der Anteil der Sommer-Linde etwa doppelt so hoch wie der der Winter-Linde. Mehrstämmiger Stockausschlag und Tiefverzwieselung (unter 1 m Baumhöhe) in zwölf beobachteten Fällen in der *Senke* (drei bei der Winter- und neun bei der Sommer-Linde) und neun erkannten Fällen in der *Kuppe* (sieben der Winter-Linde, zwei der Sommer-Linde) reduzierte die notwendige Probenzahl okular sichtbarer gleicher Genorte auf 57 Winter-Linden und 38 Sommer-Linden. Aufgrund zu kleiner Stammdurchmesser konnten nur von 50 Winter-Linden (fünf nicht berücksichtigte Winter-Linden in der *Kuppe* und zwei Winter-Linden auf dem *Hang*) und 35 Sommer-Linden (drei nicht beprobte Sommer-Linden in der *Kuppe*) Kambiumproben entnommen werden. Die vergleichende Betrachtung der morphologischen Artansprache der einzelnen Baumindividuen von Sommer- und Winter-Linde mit der Artbestimmung durch die nachfolgende genetische Analyse ergab in zwei Fällen einen Widerspruch zwischen dem morphologisch als Winter-Linde und genetisch als Sommer-Linde identifizierten Baumindividuum. Je ein Fall kam in der *Senke* (Baumnummer 158) und *Kuppe* (Tiefzwiesel Baumnummer 281/283) vor. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei diesen beiden Individuen um den natürlichen Bastard von Sommer- und Winter-Linde, *Tilia x europaea*, handelt. Ungeachtet dessen werden nachfolgend die von FUSSI (2014) durchgeführten genetischen Analysenergebnisse wiedergegeben, die auf der Grundlage der genetischen Artbestimmung von **50** Genorten der Winter-Linde und **35** der Sommer-Linde erfolgten: Das unterschiedliche Vorkommen an Sommer- und Winter-Linde in den drei Versuchsflächen kommt auch im Artenverhältnis (Sommer- zu Winter-Linde) und der Anzahl

²³ Baum Nr. 127 (Winter-Linde) kommt sowohl im Flächenumriss der *Kuppe* als auch der Fläche *Hang* aufgrund der Flächenüberschneidung vor. Er wurde bei der *Kuppe* erfasst.

der analysierten Genproben zum Ausdruck (Abb. 4.6-5, Tab. 4.6-7). Im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* sind die beiden Baumarten annähernd gleichverteilt, auf der *Kuppe* dagegen ca. 25 : 75 und in der Fläche *Hang* ca. 70 : 30 (Sommer- zu Winter-Linde) (Abb. 4.6-5).

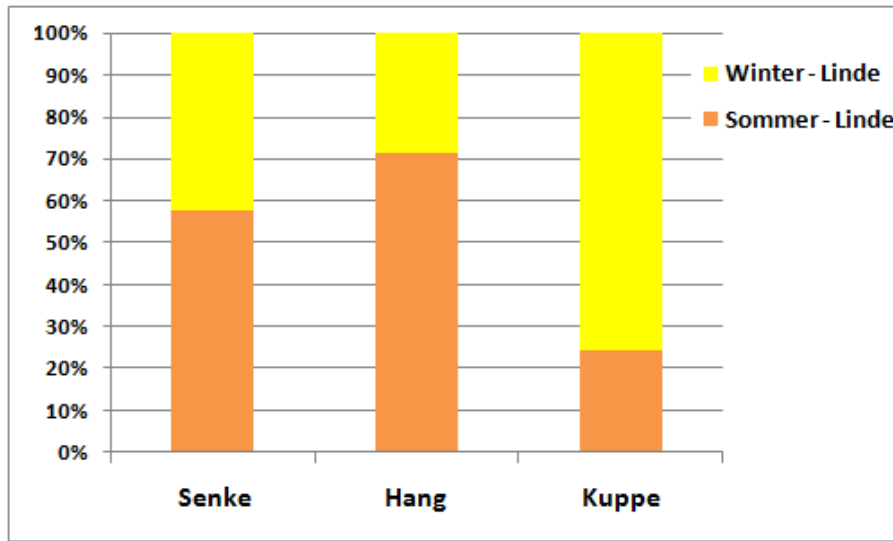


Abb. 4.6-5: Prozentualer Anteil an Winter- und Sommer-Linde je Untersuchungsfläche anhand der genetischen Artbestimmung

Trotz geringerer Probenzahlen hat die Sommer-Linde eine höhere Anzahl an Allelen über alle untersuchten Genorte (Tab. 4.6-7 und Abb. 4.6-5). Auch die Anzahl der privaten Allele sind bei der Sommer-Linde deutlich höher. Diese Unterschiede beeinflussen in weiterer Folge die genetischen Unterschiede zwischen den drei Untersuchungsflächen.

Tab. 4.6-7: Genetische Diversitätswerte der beiden Lindenarten anhand von elf Genorten

Baumart	Probenzahl	Anzahl der Allele [Na]	mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]	Anzahl der privaten Allele [Np]	prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [Ho]	erwarteter ²⁴ prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]
Sommer-Linde	35	10,0	4,7	6,4	67,8	74,9
Winter-Linde	50	7,5	2,9	3,8	55,6	57,8

4.6.2.1 Genetische Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen

Die genetischen Parameter der Untersuchungsflächen wurden unabhängig von der Baumartendifferenzierung in Sommer- und Winter-Linde berechnet (Tab. 4.6-8). Höhere Diversitätswerte (Anzahl der Allele [Na], mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]) wurden im *Eschen-Buchenwald* der *Senke* gefunden. Auch der prozentuale Anteil heterozygoter Individuen [Ho] und erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He] sind in dieser Fläche höher als im *Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* und des *Hangs*. Als Ursache

²⁴ unter Hardy-Weinberg-Gleichgewicht erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]

ist die festgestellte höhere Anzahl an Allelen über alle Genorte bei der Sommer- Linde und deren niedrigerer prozentualer Anteil in der Bestockung der *Kuppe* anzunehmen. Letzteres Kollektiv enthält mehr Proben, hat aber eine deutlich geringere mittlere effektive Anzahl von Allelen ([Ne]-Wert). Da sich in der Fläche *Hang* sehr wenige Individuen der Winter- und Sommer-Linde befinden, lassen sich die Daten dieser Fläche schlecht mit den beiden anderen Flächen vergleichen. Dennoch überrascht die hohe Diversität und Heterozygotie dieser wenigen Individuen im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenareal* des *Hangs*.

Tab. 4.6-8: Genetische Diversitätswerte der drei Flächen anhand von elf Genorten

Fläche	Proben- zahl	Anzahl der Allele [Na]	mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]	Anzahl der privaten Allele [Np]	prozentualer Anteil hetero- zygoter Individuen [Ho]	erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]
<i>Waldökosystem</i>						
Senke <i>Eschen-Buchenwald</i>	32	11,4	6,0	2,2	63,0	80,9
Hang <i>Bingelkraut- Winterlinden- Buchenwald</i>	5	7,2	5,7	0,5	66,2	80,4
Kuppe <i>Bingelkraut- Winterlinden- Buchenwald</i>	48	10,4	3,7	1,5	58,2	70,3

Der genetische Abstand nach NEI (1972) ist am geringsten zwischen den Linden des *Eschen-Buchenwaldes* der *Senke* und den Linden des *Winterlinden-Buchenwaldes* der *Kuppe* und am höchsten zwischen den beiden Teilarealen des *Winterlinden-Buchenwaldes* der *Kuppe* und des Oberhanges des Fläche *Hang* (Tab. 4.6-9).

Tab. 4.6-9: Genetischer Abstand der Linden zwischen den drei Standorten (NEI 1972)

	Senke <i>Eschen- Buchenwald</i>	Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden- Buchenwald</i>
Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	0,283	–
Kuppe <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	0,182	0,412

4.6.2.2 Genetische Unterschiede zwischen den Durchmesserklassen

Zwischen den verschiedenen Durchmesserklassen lassen sich nur geringe Unterschiede in den Diversitätswerten feststellen (Tab. 4.6-10). Die Anzahl der Allele ([Na]-Wert) und die Anzahl der privaten Allele ([Np]-Wert) sind von der Anzahl der Individuen in den einzelnen Gruppen stärker abhängig, als die mittlere effektive Anzahl von Allelen, der [Ne]-Wert.

Tab. 4.6-10: Genetische Diversitätswerte (Mittelwerte) der vier Durchmesserklassen anhand von elf Mikrosatellitengenen.

Durchmesser- klasse	Probenzahl	Anzahl der Allele [Na]	mittlere effektive Anzahl von Allelen [Ne]	Anzahl der privaten Allele [Np]	prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [Ho]	erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen [He]
< = 40mm	16	7,5	4,3	0,4	61,6	73,4
41–200 mm	44	11,8	4,5	2,3	57,7	75,8
201–400 mm	16	9,3	5,5	1,0	68,1	79,6
> 400mm	9	7,3	4,7	0,2	61,6	76,8

Der genetische Abstand (NEI 1972) zwischen den Durchmesserklassen unterliegt auffälligen Schwankungen. Zwischen den beiden schwächsten Durchmesserklassen, der Dichtung bzw. dem Stangenholz (41 mm bis 200 mm) sowie der Verjüngung (≤ 40 mm), ist er mit 0,105 gering (Tab. 4.6-11).

Tab. 4.6-11: Genetischer Abstand zwischen den vier Durchmesserklassen (NEI 1972)

Durchmesserklasse	≤ 40mm	41 bis 200 mm	201 bis 400 mm
41 bis 200 mm	0,105	–	
201 bis 400 mm	0,174	0,152	–
> 400 mm	0,150	0,139	0,157

Ein größerer Abstand ist mit Werten von 0,139 und 0,15 zwischen diesen beiden schwächsten Durchmesserklassen und dem Altholz (> 400 mm) festzustellen.

Der größte Abstand besteht jedoch zwischen dem schwachen bis mittleren Baumholz (Durchmesserklasse 201 mm bis 400 mm) und der schwächsten Durchmesserklasse (≤ 40 mm). Die Unterschiede dieser Klasse (des schwachen bis mittleren Baumholzes) sowohl zum Altholz (Durchmesserklasse > 400 mm) als auch zum Stangenholz (Durchmesserklasse 41 mm bis 200 mm) sind mit 0,157 bzw. 0,152 überdurchschnittlich hoch. Offensichtlich haben sich zum Zeitpunkt der Etablierung dieser mittleren Baumgeneration zu Beginn des Disintegrationsstadiums erfolgreich Linden von außerhalb der Untersuchungsflächen mit ihrem genetischen Erbgut verjüngt. Dies war zum Zeitpunkt der Entstehung der beiden jüngeren Durchmesserklassen nicht wiederholbar. Die besondere genetische Ausstattung der mittleren Baumgeneration ist an der mittlere effektiven Anzahl von Allelen, dem prozentualen Anteil heterozygoter Individuen [Ho] sowie dem erwarteten prozentualen Anteil heterozygoter Individuen [He] erkennbar (Tab.4.6-10).

4.6.2.3 Vegetative Vermehrung

Unbeachtet der bereits bei der Probennahme beobachteten vegetativen Vermehrung (Stockausschlag bzw. Tiefverzweiselung), die zur reduzierten Probenanzahl führte, wurden

bei der genetischen Auswertung der 85 Einzelproben durch Fussl (2014) in fünf Einzelfällen nochmals idente Genorte festgestellt: Vier der fünf identischen Genorte wurden in der *Kuppe* (Baumnummern 305/31; 14/215 (Winter-Linde) sowie 236/238; 12/239; (Sommer-Linde) und einer (Baumnummern 239/240, Sommer-Linde) in der *Senke* identifiziert. Diese Proben wurden in der Tab. 9.4-9 (in den Anlagen) mit Buchstaben gekennzeichnet und grün markiert. Dabei bezeichnen dieselben Buchstaben einen identen Genotyp (A–E für fünf idente Paare). Alle anderen Proben haben einen einzigartigen Genotyp und wurden mit Zahlen gekennzeichnet. Der signifikant höhere Anteil heterozygoter Allele der Sommer-Linde an den untersuchten Mikrosatellitenorte bewegt sich zwischen fünf (Minimum) und elf (Maximum) von elf Genorten, der der Winter-Linde zwischen ein (Minimum) und neun (Maximum) von zehn Genorten (Abb. 4.6-6).

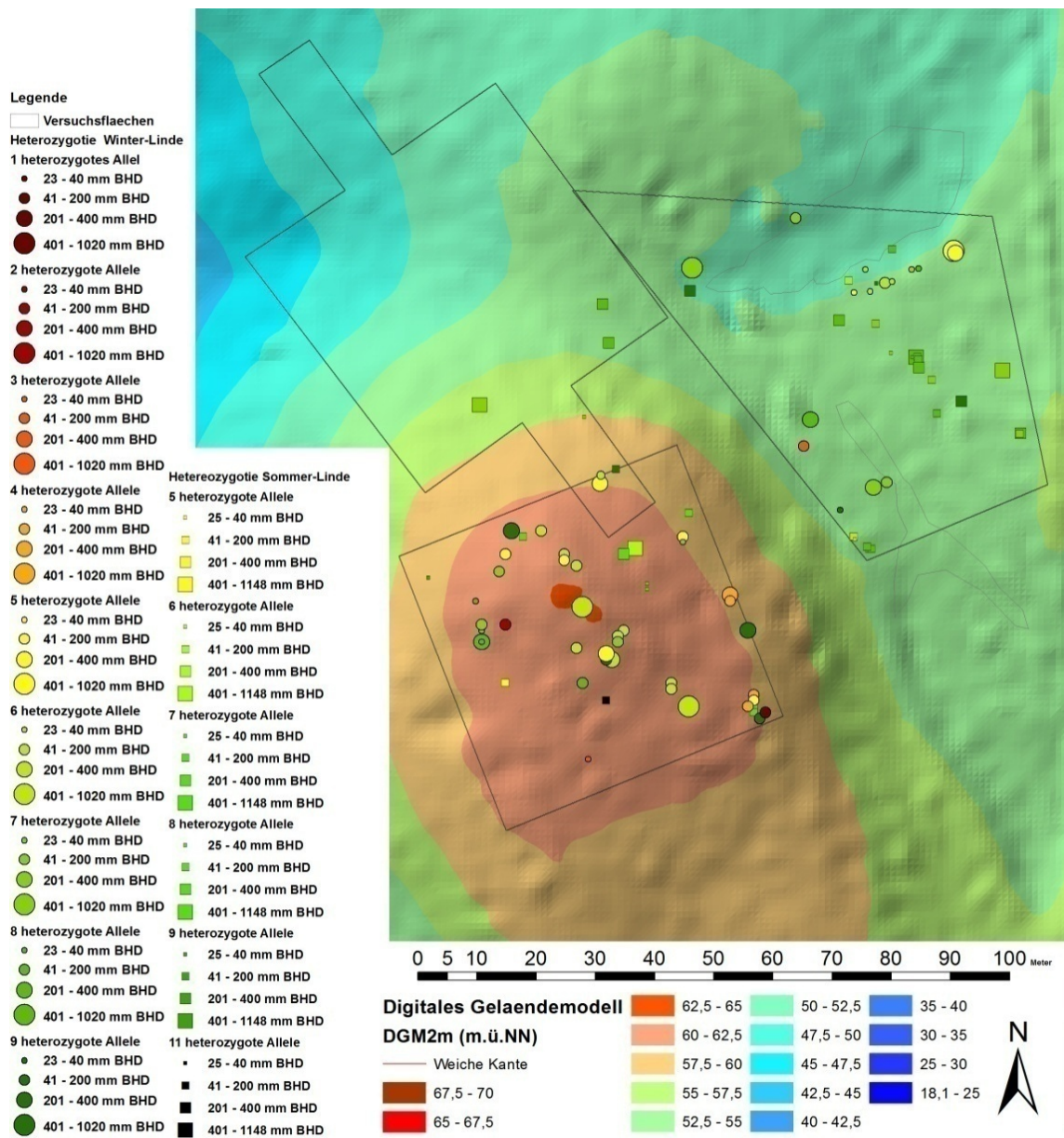


Abb. 4.6-6: Heterozygote Allelhäufigkeiten an den untersuchten Genorten der Baumarten Winter-Linde und Sommer-Linde, skaliert nach der Größe der Brustdurchmesser

4.6.2.4 Analyse des Vorkommens seltener und privater Allele

Die Anzahl seltener Allele [5 %], d. h. Allele mit einer Häufigkeit von höchstens 5 % an den elf untersuchten Mikrosatellitenorten, ist bei der Sommer-Linde (mit bis zu acht seltenen Allelen [5 %]) im Vergleich zur Winter-Linde (mit bis zu vier seltenen Allelen [5 %]) deutlich höher (Abb. 4.6-7). Der höchste Wert wurde an je einer Sommer-Linde im *Eschen-Buchenwald* und im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der Hangfläche mit acht seltenen Allelen [5 %] festgestellt.

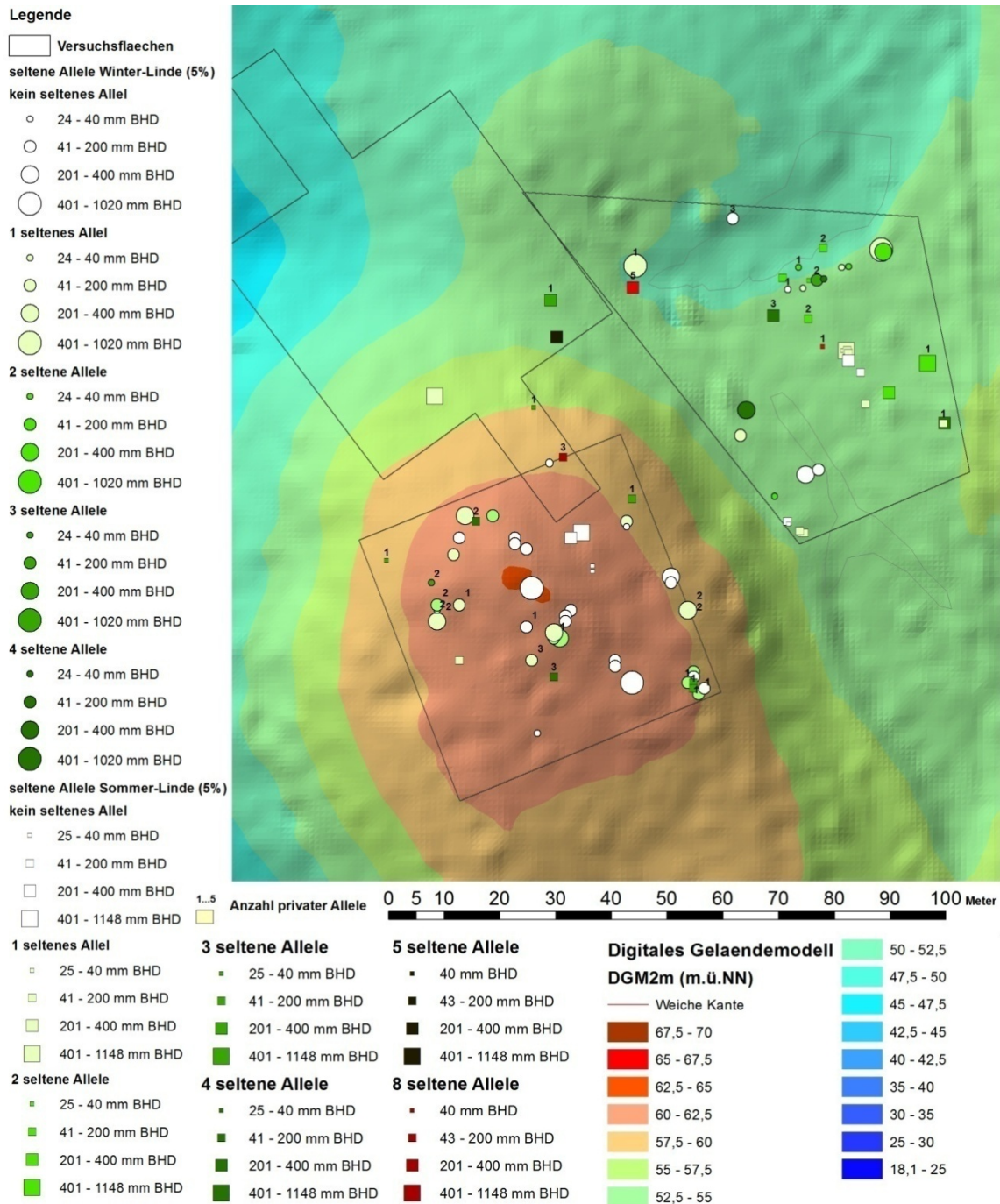


Abb. 4.6-7: Winter- und Sommer-Linden mit seltenen Allelen (5 %) und privaten Allelen an den untersuchten elf Mikrosatellitenorten, skaliert nach der Größe der Brustdurchmesser

Auffallend ist der hohe Anteil seltener Allele [5 %] an den wenigen Exemplaren der Sommer-Linde im Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldareal des *Hanges* (Tab. 4.6-12). Sie sind für die hohen Diversitätswerte der Linden in der Fläche *Hang* ursächlich verantwortlich. Da diese Sommer-Linden nur teilweise der Jungwuchsklasse angehören, scheidet als alleinige Erklärungsursache die geringe Durchmesserklasse (aufgrund der noch nicht beendeten Stammzahlselektion in der Jungwuchsklasse/Stangenholzklasse) aus. Seltene Allele mit nur einem prozentualen Anteil an der Gesamtpopulation kommen bei der Sommer-Linde nicht vor.

Tab. 4.6-12: Ergebnisse der Genetischen Analysen hochgerechnet auf die absoluten Stammzahlen der Sommer-Linde (unter Berücksichtigung genetisch identischer Zwiesel und Stockausschlag)

Fläche Waldökosystem	Stamm- zahlen	Anzahl seltener Allele [5 %]	Anzahl seltener Allele [1 %]	Anzahl privater Allele
Kuppe <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	17	22	–	9
Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i> <i>Bingelkraut-Buchenwald</i>	5	20	–	5
Senke <i>Eschen-Buchenwald</i>	27	44	–	15

Die Anzahl privater Allele sowohl bei der Sommer- als auch der Winter-Linde erreicht in der Durchmesserklasse Stangenholz (41 mm bis 200 mm) ihr Maximum (Abb. 4.6-7 und Tab. 4.6-11). Bei der Winter-Linde kommen zusätzlich seltene Allele mit nur einem prozentualen Anteil an der Gesamtpopulation an den Mikrosatellitengenenorten vor, die überwiegend zugleich private Allele darstellen, d. h., nur einmal in der untersuchten Population an genau diesem Genort vorkommen.

Tab. 4.6-13: Ergebnisse der Genanalysen hochgerechnet auf die absoluten Stammzahlen der Winter-Linde (unter Berücksichtigung genetisch identischer Zwiesel und Stockausschlag)

Fläche Waldökosystem	Stamm- zahlen	Anzahl seltener Allele [5 %]	Anzahl seltener Allele [1 %]	Anzahl privater Allele
Kuppe <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i>	48	29	20	20
Hang <i>Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald</i> <i>Bingelkraut - Rotbuchenwald</i>	2 ²⁵	1	–	–
Senke <i>Eschen-Buchenwald</i>	17	24	7	8

²⁵ Baum Nr. 127 (Winter-Linde) kommt sowohl im Flächenumriss der *Kuppe* als auch des *Hangs* aufgrund der Flächenüberschneidung vor. Er wurde für die *Kuppe* erfasst.

Auffällig ist das gehäufte Auftreten seltener Allele [5 %] bei der Winter-Linde im Eschen-Buchenwald der *Senke*.

Kurze Zusammenfassung

Buchenpopulation

- An zehn Mikrosatellitenorten der untersuchten drei Buchenpopulationen konnten genetische Diversitätswerte beobachtet werden die die vergleichsweise hohe genetische Diversität der Buchen im Nordostdeutschen Tiefland bestätigen.
- Der genetische Abstand nach NEI (1972) sowohl zwischen den 199 Buchen der drei Flächen als auch zwischen den Buchen der verschiedenen Durchmesserklassen ist als sehr gering einzuschätzen.
- Der Anteil heterozygoter Allele an den zehn Mikrosatellitenorten schwankt zwischen drei und zehn. Die Heterozygotiewerte treten geklumpt in einer typischen Ausdehnung von 20 m bis 30 m auf.
- Die Anzahl seltener Allele [5 %] ist trotz unterschiedlicher Probenzahlen zwischen den Populationen annähernd gleich verteilt. Der höchste Anteil seltener Allele [1 %] ist in der Jungwuchs- und Stangenholzklasse vorhanden. Im Vergleich zum *Bingelkraut-Buchenwald* des Mittel- bis Unter-*Hangs* ist in den beiden Buchenmischwald-Ökosystemen eine vergleichsweise höhere durchschnittliche Ausstattung mit seltenen und privaten Allelen festzustellen, die im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* am höchsten ist.

Lindenpopulation

- Es konnten 50 Individuen der Winter-Linde und 35 der Sommer-Linde an elf Mikrosatellitenorten untersucht werden. Die Gesamtpopulation der drei Flächen, die sich im Jahre 2012 aus insgesamt 116 Individuen zusammensetzte, wies 26 identische Genorte aus vegetativer Vermehrung auf. Für die Artunterscheidung wurde der Genort Tc 918 verwendet, der nur bei der Sommer-Linde vorkommt.
- Die Lindenpopulationen der drei Flächen unterscheiden sich im Anteil an Sommer- und Winter-Linden.
- Die Sommer-Linde hat im Vergleich zur Winter-Linde eine deutlich höhere Anzahl an Allelen sowie mehr private Allele über alle Genorte.
- Der genetische Abstand nach NEI (1972) zwischen den Linden der drei Flächen ist im Unterschied zu den drei Buchenpopulationen nicht einheitlich. Zwischen den Linden der beiden Teilareale des *Winterlinden-Buchenwaldes* der *Kuppe* und des Ober-*Hangs* besteht ein auffallend großer genetischer Abstand.
- Zwischen den einzelnen Durchmesserklassen der Lindenpopulation bestehen ebenfalls keine einheitlichen genetischen Abstände. Die mittlere Baumgeneration (Durchmesserklasse 201 mm–400 mm) unterscheidet sich auffällig von den schwächeren und stärkeren Durchmesserklassen.

4.6.3 Diskussion zu den genetischen Analysen

Das Ziel der genetischen Untersuchung an den in den drei Flächen vorhandenen Buchen sowie Sommer- und Winter-Linden, bestand in einer Inventur der genetischen Struktur als Ausgangspunkt für ein genetisches Monitoring. Diesem Anspruch versuchte das mit den Laboranalysen beauftragte Bayerische Amt für forstliche Saat- und Pflanzenanzucht mit zehn selektionsneutralen genetischen Markern gerecht zu werden von denen angenommen wird, „dass sie eher die *gesamtgenetische Variation im Sinne einer Zufallsstichprobe aus der Grundgesamtheit der genetischen Merkmale repräsentieren*“ (GREGORIUS ET AL. 2004, XIII). Die Identifikation autochthoner Waldbaumpopulationen konnte auch aufgrund der nur bis Anfang des 19. Jahrhunderts zurückzuverfolgenden Wald- und Forstgeschichte, Kapitel 2.3, nicht Gegenstand der genetischen Inventur sein (SCHOPPA 2000). Die Analyseergebnisse ermöglichen sowohl den flächenspezifischen Vergleich der genetischen Variabilität der drei Baumarten untereinander als auch mit anderen untersuchten Buchen- und Buchenmischbeständen.

Genetische Strukturen der Buchenpopulation

Vergleichende Studien von Buchenwäldern der planaren, submontanen und montanen Höhenstufe im Süden, Westen und Nordosten Deutschlands, basierend auf Isoenzymanalysen und Mikrosatellitenmarker, verweisen übereinstimmend auf eine vergleichsweise hohe genetische Variabilität der Buchenwälder im Nordostdeutschen Tiefland (KONNERT ET AL. 2007, 19 f.; RAJENDRA ET AL. 2014, 148). Mit molekularen Markern wurden im Vergleich zu biochemischen Bestimmungsmethoden in Buchenpopulationen höhere genetische Variationswerte ermittelt (ISLEIB 2006, 64; MAURER ET AL. 2008, 22). Ein Vergleich von genetischen Inventuren in Buchenbeständen setzt deshalb einheitliche Genmarker voraus. Die Untersuchungsergebnisse im *Faulen Ort* bestätigen die vergleichsweise hohe genetische Diversität, wie sie in einer vergleichenden Studie von Buchen- und Buchenmischwäldern der planaren bis montanen Höhenstufe in Deutschland festgestellt wurde (RAJENDRA ET AL. 2014, 138 ff.; Tab. 4.6-14).

Tab. 4.6-14: Ausgesuchte genetische Variabilitätswerte von Buchenbeständen (verändert nach RAJENDRA ET AL. 2014, 138 ff.) Mit fs3-04 und mfs11 waren zwei Genorte in beiden Untersuchungen identisch

Fläche	Höhenstufe	Höhe (m)	Anzahl Genorte	$\sum N$ (\sum Pop)	H_o \bar{x}_g	H_e \bar{x}_g	N_a \bar{x}_g
Exploratorien Schwäbische Alb	mittelmontan	740–791	9	1197 (10)	0,616	0,616	7,74
Exploratorien Hainich	hochcollin bis submontan	333–503	9	1199 (10)	0,615	0,622	8,08
Exploratorien Schorfheide Chorin	planar	55–98	9	1218 (10)	0,623	0,631	8,34
diese Untersuchung (<i>Fauler Ort</i>)	planar	49–62,5	10	199 (3)	0,693	0,71	9,06

H_o – prozentualer Anteil heterozygoter Individuen; H_e – erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen; N_a – Anzahl der Allele; \bar{x}_g – geometrisches Mittel

Darauf deuten die je Mikrosatellitengenort beobachtete höhere durchschnittliche Ausstattung der Buchen mit seltenen (1 % und 5 % Anteil an der Gesamtpopulation) und privaten Allelen auf der zur Trockenheit neigenden *Kuppe* im *Faulen Ort* hin (Tab. 4.6-5). Ähnliches beobachtete auf Grenzstandorten der Buche BARRIERE ET AL. (1985). Die interpolierten Heterozygotiewerte der Buchen in den drei Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* treten überwiegend mit einem Radius von 20 bis 30 m geklumpt auf (Abb. 4.6-2). Ähnliches beobachtete auf Basis von Isoenzymanalysen DOUNAVI (2000) und auf Basis von Mikrosatellitenmarkern VORNAM ET AL. (2004). Der Heterozygotiewert schwankt von 3 (Minimum) bis 10 (Maximum). Der genetische Abstand sowohl zwischen den drei untersuchten Buchenpopulationen auf den Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* als auch zwischen den Durchmesserklassen ist als sehr gering einzuschätzen (NEI 1972). Die Wuchsklasse Stangenholz weist gegenwärtig eine im Vergleich geringfügig höhere Anzahl von Allelen ([Na]-Wert) sowie privater Allele ([Np]-Wert) auf (Tab. 4.6-5). Auffällig ist das alleinige Vorkommen von Buchen mit mindestens fünf seltenen Allelen [5 %], sowohl zweimal auf der *Kuppe*, einmal in der *Senke*, als auch die Häufung des Auftretens privater Allele in der Buchenmischwaldzone der Flächen Ober-*Hang* (2), *Kuppe* (5) und *Senke* (5) (Abb. 4.6-3).

Genetische Struktur der beiden Lindenpopulationen

Die in der Erstinventur festgestellten elf Sommer- und 16 Winter-Linden verjüngten sich erfolgreich und etablierten sich in der neuen Bestandesgeneration. Unter den in der Wiederholungsinventur vorgefundenen 67 Winter- und 49 Sommer-Linden befanden sich 21 bereits bei der Probennahme erkannte vegetativ vermehrte Linden. Weitere fünf Individuen konnten anhand der genetischen Analysen als identische Genorte identifiziert werden, so dass insgesamt zwölf Winter-Linden und 14 Sommer-Linden aus vegetativer Vermehrung entstammen. Die Mehrheit (89 Exemplare) entstand aus generativer Vermehrung. Insofern ist die in der Literatur angetroffene Feststellung, „die Lindenarten verjüngen sich nur wenig aus Samen, obwohl sie reichlich Früchte produzieren. Ausgeprägt ist hingegen ihre Fähigkeit zu Stockausschlag und Wurzelbrut“ (BARENGO 2001, 2), für die beobachteten Waldökosysteme nicht zutreffend. Sommer- und Winter-Linde verfügen über artspezifische Allele, die eine Unterscheidung der beiden Arten ermöglichen (FROMM 2001, 155). FUSSI (2014) verwendete für die Artunterscheidung den Genort Tc 918, der nur bei der Sommer-Linde vorkommt (PHUEKVILAI & WOLFF 2013). Mit dieser Methode konnten 15 im Winterzustand anhand morphologischer Merkmale angesprochene Individuen der genetisch korrekten Baumart zugeordnet werden. Eine nochmalige morphologische Sommeransprache der 85 ausgewählten Linden bestätigte für 13 Linden die genetische Zuordnung. Zwei Lindenindividuen, die genetisch als Sommer-Linde identifiziert wurden, trugen jedoch morphologische Merkmale der Winter-Linde. Hierbei könnte es sich um den natürlichen Winter-Sommerlindenhybrid *Tilia x vulgaris* handeln.

Sommer- und Winter-Linde nehmen in den Flächen unterschiedliche Flächenanteile ein: Während in der *Senke* beide Arten in etwa gleich stark vertreten sind, dominiert auf der *Kuppe* die Winter-Linde mit 75 % Anteil aller Linden. In der Fläche *Hang* (Mittel- bis Oberhang) überwiegt die Sommer-Linde bei insgesamt sehr geringen Individuenzahlen. Trotz geringerer Probenzahlen konnte bei der Sommer-Linde eine markant höhere Anzahl heterozygoter Allele, sowohl effektiver als auch privater Allele, über alle Genorte festgestellt werden (Tab. 4.6-7). Die festgestellten Unterschiede in den genetischen Diversitätswerten zwischen den Linden der Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* sind deshalb in erster Linie in

den unterschiedlichen Anteilen an Sommer- und Winter-Linden begründet. Auffallend sind im Gesamtkollektiv die hohen Diversitätswerte der beiden Lindenarten (7 Individuen) in der Fläche *Hang* (Tab. 4.6-8). Sowohl letzteres als auch die unterschiedlichen Sommer-Lindenanteile sind als Ursache für den mit 0,412 relativ hohen genetischen Abstand zwischen den Flächen *Hang* und *Kuppe* anzunehmen (NEI 1972).

Der genetische Abstand NEI (1972) zwischen den Durchmesserklassen ist unterschiedlich groß. Zwischen den beiden schwächsten Durchmesserklassen, der Dichtung bzw. dem Stangenholz (41 mm bis 200 mm) sowie der Verjüngung (≤ 40 mm), ist er mit 0,105 gering (Tab. 4.6-11). Ein auffälliger genetischer Abstand besteht jedoch mit einem Wert $> 0,15$ zwischen dem schwachen bis mittleren Baumholz (Durchmesserklasse 201 mm bis 400 mm) und allen anderen Durchmesserklassen. Am größten ist der genetische Abstand mit 0,174 zur schwächsten Durchmesserklasse (≤ 40 mm). Offensichtlich haben sich zum Zeitpunkt der Etablierung dieser mittleren Baumgeneration zu Beginn des Disintegrationsstadiums erfolgreich Linden von außerhalb der Untersuchungsflächen verjüngt. Die besondere genetische Ausstattung der mittleren Baumgeneration ist an der mittleren effektiven Anzahl von Allelen, dem prozentualen Anteil heterozygoter Individuen [H_o] sowie dem erwarteten prozentualen Anteil heterozygoter Individuen [H_e] erkennbar (Tab.4.6-10).

Vergleichende mit Mikrosatellitenmarkern in Lindenbeständen durchgeführte genetische Studien konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Vom Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenanzucht für Vergleichszwecke zur Verfügung gestellte Untersuchungsergebnisse von Winter-Linden-Saatgutbeständen und einer Winter-Linden-Samenplantage, zeigen die in allen Parametern höheren genetischen Diversitätswerte der Sommer-Linden im *Faulen Ort* (FUSSI & CREMER 2017; Tab. 4.6-15).²⁶

Tab. 4.6-15: Vergleichende Darstellung genetischer Diversitätswerte von Sommer- und Winterlinden-Beständen (verändert nach FUSSI & CREMER 2017, 2)

Baumarten	N	N _a	N _e	N _p	H _o	H _e	uH _e
Sommerlinde <i>Fauler Ort</i>	35	9,700	4,850	5,100	0,686	0,753	0,764
Winterlinde <i>Fauler Ort</i>	50	7,900	2,974	1,200	0,572	0,597	0,603
Saatgutpartie 1 Winterlinde	48	5,500	3,060	0,200	0,378	0,546	0,552
Saatgutpartie 2 Winterlinde	48	6,700	3,730	0,400	0,512	0,603	0,610
Samenplantage Winterlinde	10	5,500	3,429	0,300	0,570	0,597	0,628

N_a – Anzahl der Allele; N_e – mittlere effektive Anzahl von Allelen; N_p – Anzahl privater Allele; H_o – prozentualer Anteil heterozygoter Individuen; H_e – erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen; uH_e – erwarteter stichprobenunabhängiger prozentualer Anteil heterozygoter Individuen

Bei den Winter-Linden im Faulen Ort fallen die vergleichsweise höheren N_a-, N_p- und die H_o-Werte auf, der N_e-Wert ist im Flächenvergleich kleiner. Die H_e- sowie uH_e-Werte sind hingegen auf vergleichbarem Wertenniveau.

²⁶ Für den Flächenvergleich wurden die Werte für die Linden im Faulen Ort ohne den Genort Ts7 neu berechnet, um eine vergleichbare Aussage mit einheitlichen zehn Genmarkern treffen zu können.

Neben der Untersuchung und Beschreibung der regionalspezifischen genetischen Variabilität mittels Mikrosatellitenmarker zur Erweiterung der genetischen Kenntnisse über die regionale Spezifik der Buchenpopulationen in Nordostdeutschland wäre eine Untersuchung genetisch bedingter differenzierter ökophysiologischer Anpassungsfähigkeit der Buchen- und Lindenindividuen an die skizzierten unterschiedlichen Standortsbedingungen wünschenswert gewesen. Genetische Vielfalt ist zwar die natürliche Voraussetzung für Anpassung an räumlich und zeitlich wechselnde Anforderungen der Umwelt. *„Sie ist somit auch ein Wert an sich...“* Aber: *„Das Problem der Bewertung genetischer Vielfalt ist wohl nur in Verbindung mit spezifischen Zielsetzungen zweckmäßig zu behandeln“* (GEGORIUS ET AL. 2004, XIV). Die hierfür erforderlichen Arbeiten zur Identifizierung anpassungsrelevanter Gene, beispielsweise für Trockenstress oder Blattaustrieb, stehen für die Buche erst am Anfang und für die beiden Lindenarten haben sie noch gar nicht begonnen (FUSSI ET AL. 2014, MÜLLER ET AL. 2017).

5. Übergreifende Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung übergreifend diskutiert. Dabei werden die Arbeitshypothesen nacheinander einer Prüfung unterzogen.

These 1: *Die Verjüngung erfolgt in der Regel nicht einzelstammweise, sondern in Gruppenstrukturen, die eine Tendenz zu kleinflächigen, mehr oder weniger gleichalten Einartbeständen mit genetisch ähnlichen Familienstrukturen aufweisen.*

Es konnte im Rahmen der GIS-gestützten Wiederholungsinventur aufgezeigt werden, dass die Verjüngung eine Tendenz zu trupp-, gruppen- bis maximal horstweise²⁷ baumartenreinen Gruppenstrukturen mit gleicher Baumhöhe aufweist (Abb. 4.2-8, 4.2-23). Baumarteneinzelmischungen bilden die Ausnahme. Das bestätigt diesen wichtigen Teilaspekt der These 1. Im Rahmen der genetischen Inventur festgestellte und interpolierte Heterozygotiewerte der Buchen zeigen in allen drei Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* in eben diesem Radius von 20 m bis 30 m Klumpungserscheinungen, was auf genetisch ähnliche Familienstrukturen in diesem Raum hindeutet (Abb. 4.6-2). Sie entsprechen den in der Literatur in Buchennaturwäldern festgestellten Beobachtungen (DOUNAVI 2000; VORNAM ET AL. 2004).

Die gewählte georeferenzierte Arbeitsweise erlaubte eine als *unmittelbare* und *vermittelte* wissenschaftliche Beobachtung (KLAUS & BUHR 1987, 211 ff.) bezeichnete Arbeitsweise der in dem Zeitraum zwischen Erst- und Wiederholungsinventur stattgefundenen dynamischen Prozesse im Sinne einer Veränderungsanalyse der Vegetation, der Bestockung und des Oberbodens (sowie eine raumbezogene Inventur der Lichtökologie und der genetischen Diversität). Im GIS implementierte geostatistische Auswerteverfahren (Interpolation, wie Inverse Distanzwichtung und Kriging) gestatteten die Aufdeckung des Zusammenhangs zwischen erfolgreicher Verjüngung der Hauptbaumarten und ihrer spezifischen standörtlichen (insbesondere mikroklimatischen) Nischen (Abb. 4.2-25 bis 4.2-28).

These 2: *Ein entstehender neuer Zyklus ist in seiner Baumartenzusammensetzung und Systemstruktur standörtlich differenziert.*

Es bildete sich auf den höchsten Erhebungen, repräsentiert durch die Versuchsfläche *Kuppe* und dem Ober-*Hang* der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* heraus, in der in reliefbedingt trockener Lage auf einem karbonathaltigen, anhydromorphen Standort, unter einem Schirm von Winter- und Sommer-Linde, Buche, Hainbuche, Berg- und Spitz-Ahorn und Gemeiner Esche (sowie Berg-Ulme und Schwarzem Holunder in der 2. und 3. Baumschicht) eine artenreiche Bodenvegetation entstand (Abb. 4.1-1). Bei zunehmender Luftfeuchte und Luftkühle geht unterhalb des Nordwest-exponierten Mittel-*Hangs* dieses Waldökosystem in den kalkliebenden *Bingelkraut-Buchenwald* über, in dem die Buche (und der Berg-Ahorn) die alleinige bestandesbildende Kraft besitzen. Im Osten des Naturwaldes hat sich in einer grundfeuchten *Senke* das Waldökosystem des kalkliebenden *Eschen-Buchenwaldes* herausgebildet. Kennzeichnend für dieses Waldökosystem ist ein gutwüchsiger Mischbestand aus Buche, Berg- und Spitz-Ahorn, Winter- und Sommer-Linde, Gemeiner Esche, Rot-Erle sowie Berg-Ulme in der 2. Baumschicht (Abb. 4.2-8, 4.2-37). Die skizzierten mikroklimatischen Unterschiede zwischen der reliefbedingt trocken-warmen *Kuppe* und dem

²⁷ truppweise (bis 0,03 ha, 9,77 m Radius); gruppenweise (bis 0,1 ha, 17,84 m Radius); horstweise (ab 0,11 ha bis maximal 0,3 ha, ab 17,84 m Radius) BRA (2000)

Ober-*Hang*, der hangabwärts ab dem Mittel-*Hang* zunehmenden Kühle sowie der warmen und zugleich grundfeuchten *Senke* sind anhand eines vegetationsanalytischen Methodenvergleichs (ELLENBERG 2000; HOFMANN & POMMER 2013; OBERDORFER 1990), indirekt herausgearbeitet worden (Tab. 4.2-16 bis 4.2-20).

Die beobachteten Werte der mittels 95 in einem systematischen Raster von 10 m x 10 m erhobenen Bodenproben des Mineralbodens der Tiefenstufe 0–5 cm entsprechen in der Gesamtschau mit einem Mittelwert des pH_{KCl} -Wertes von 5,5, des C/N Verhältnisses von 14,21 und des N_{org} in Prozent von C_{org} von 7,1 den typischen Eigenschaften einer Bodenbildung aus Geschiebemergel im Nordostdeutschen Tiefland mit dem Humuszustand Mull (RIEK & STÄHR 2004, 92 f.).

Obwohl alle drei Waldökosystemtypen zur Gruppe der Kalk-Buchenwälder gehören (HOFMANN & POMMER 2013), unterscheiden sie sich signifikant durch die Tiefe des pflanzenverfügbar anstehenden Kalks und teilweise im pH_{KCl} -Wert des Oberbodens (Abb. 4.3-3, Tab. 4.3-10 und 4.3-11). Ein direkter Zusammenhang zwischen der per Bohrstock und Feldmethode ermittelten Kalktiefe und dem rasterbezogen analysierten pH_{KCl} -Wert konnte nicht festgestellt werden. Anhand der Korrelationsanalyse nach *Pearson* ist ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen pH_{KCl} -Wert, der Geländehöhe (Z) und der Hangrichtung zu beobachten. Ursächlich hierfür dürfte der laterale Stofftransport kalkhaltigen Materials hangabwärts durch die Bodenfauna, Wildwechsel und Oberflächenwasser (im Winterhalbjahr und bei Starkregenereignissen) sein.

Flächenübergreifend konnte ein in der Interaktion von Standort (insbesondere der Kalktiefe und der Stammfeuchte) und der Baumartenzusammensetzung infolge des vertikalen (baumartenspezifischer Basenpumpeffekt) und lateralen Nährstoff- und Kalktransports herausgebildeter Vegetationszustand festgestellt werden, der flächig kartiert und georeferenziert wurde. Dieser ist zur Bewertung der Oberbodenzustände in drei soziologische Artengruppenkombinationen (HOFMANN & POMMER 2013, 28 ff.) zusammengefasst worden: Der *Mercurialis-Lamium*, der *Aegopodium-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination (Abb. 4.2-29). Diese drei soziologischen Artengruppenkombinationen unterscheiden sich gleichfalls signifikant in den beobachteten Kalktiefen sowie den dekadischen Oberbodentrophiewerten $\text{DK}_{\text{C/N}}$ und $\text{DK}_{\text{V\%}}$ (Abb. 4.2-33 und 4.2-34).

Die flächendeckende Vegetationsaufnahme (und deren Analyse über die Bildung soziologischer Artengruppenkombinationen mit der nachfolgenden Berechnung der dekadischen Weiserwerte) erwies sich als eine im Vergleich zur 10 m x 10 m Rasterbeprobung der Tiefenstufe 0–5 cm geeignetere Methode zur Herausarbeitung gradueller Oberbodenzustandsunterschiede dieser eutrophen Kalkstandorte.

These 3: *Moderne Methoden der Geoinformatik (dreidimensionale Vermessung des Baumbestandes und der Vegetation, Interpretation von Luftbildzeitreihen, Berechnung von Vegetationshöhenmodellen aus Luftbildzeitreihen, Nutzung von digitalen Geländemodellen, Darstellung und Analyse dieser in Geografischen Informationssystemen, Ableitung mathematischer Modelle) erlauben es, die im Regenerations- bzw. Formierungsprozess des Buchenmischwaldes ablaufenden Prozesse in ihrer Vielfalt hinreichend zu erfassen, zu*

rekonstruieren, zu analysieren und auf dieser Grundlage auch Entwicklungsprognosen zu formulieren.

Durch die flächenvergleichende Analyse der Durchmesser-Höhen-Beziehungen der Buchen mit den anderen Mischbaumarten ist die Ursache für die Entstehung echter Buchenmischbestände auf der *Kuppe* und in der *Senke* sowie im Unterschied hierzu des (reinen) Kalkbuchenwaldes im Mittel- bis Unter-*Hang* herausgearbeitet worden (Abb. 4.2-14 bis 4.2-17). Die Weise'sche Oberhöhe [H_o] der Buchen ist als Maß des schwer zu quantifizierbaren Mikroklimas innerhalb des Standortsfaktorenkomplexes geeignet (TARASIUK 1999, zit. nach CZAJKOWSKI 2006, 14; Tab. 4.4-11).

Unter Verwendung binär logistischer Regressionsgleichungen konnte die Wirkung der durch die Vegetationsanalyse und den Bodenanalysen herausgearbeiteten kleinflächigen mikroklimatischen und standörtlichen Unterschiede in den Flächen auf das erfolgreiche Aufwachsen der Baumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie Berg-Ahorn als mathematisches Modell herausgearbeitet werden. Dies wurde durch die georeferenzierte Arbeitsweise und die Nutzung der Software Quantum GIS möglich, die es gestattete, die Koordinaten jedes Einzelbaumes mit den hier gewonnenen standörtlichen Untersuchungsergebnissen (Kalktiefe, DGM 2 m, Exposition, Hangneigung) zu verbinden. Die Regressionsfunktionen sind zunächst für jede der vier Baumarten für alle drei Untersuchungsflächen erstellt worden. Da begründet angenommen werden konnte, dass sich die Voraussagegenauigkeit der Regressionsgleichungen durch die Trennung in den terrestrischen (*Hang* und *Kuppe*) und grundfeuchten Standortsbereich (*Senke*) erhöhen würde, sind für beide Standortgruppen getrennte Berechnungen für jede der Baumarten erfolgt.

Auf der *Kuppe* und dem Ober-*Hang* beschreiben mit 91 % die beiden hochsignifikanten Regressionskoeffizienten Geländehöhenwert Z [m] (mit positiver Wirkung) und die Kalktiefe [m] (positive Ausrichtung) das Vorkommen der Winter-Linde. Das Vorkommen der Sommer-Linde kann hier zu 95 % allein durch die Südausrichtung (positive Wirkung der Exposition) vorausgesagt werden. Das Vorkommen der Buche ist hier zu 82 % durch einen (möglichst) geringen Geländehöhenwert [Z] und einem tiefer anstehenden Kalk erklärbar. Die standörtliche Präferenz der Pionierbaumart Berg-Ahorn, die als erste beim Wechsel der Baumgeneration in die durch den Zusammenbruch der Altbäume neu entstandenen Lücken hineinwuchs, ist im Vergleich zu den Klimaxbaumarten Buche, Sommer- und Winter-Linde schlechter eingrenz- und bestimmbar. Auf den terrestrischen Standorten erklärt als signifikante Standortsfaktoren eine erhöhte Geländehöhe [Z], kombiniert mit einer Westgerichtetheit der Exposition zu 62 % das Aufwachsen des Berg-Ahorns.

In der Sondersituation der grundfeuchten *Senke* kehren sich die Wirkungen der Regressionskoeffizienten teilweise um: Das Vorkommen der Buche (zu 75 %) und der Sommer-Linde (zu 90 %) wird durch einen möglichst großen Geländehöhenwert [Z] modellhaft in der *Senke* erklärt. Im Unterschied zur Sommer-Linde, deren Vorkommen im Regressionsmodell zusätzlich durch Standorte mit hoch anstehendem Kalk vorhergesagt werden kann, bevorzugt die Buche hier jedoch Standorte mit einem tief anstehenden Kalk. Für das Aufwachsen der Winter-Linde in der *Senke* kann ein möglichst niedriger Geländehöhenwert [Z] als alleiniges Standortskriterium das Vorkommen zu 91 % richtig erklären. Für das Vorkommen des Berg-Ahorns ist die signifikante Wirkung von hoch

anstehendem Kalk und eines möglichst niedrigen Geländehöhenwertes Z entscheidend für die positive Voraussage.

Die Georeferenzierung ermöglichte die Analyse der Waldentwicklung anhand historischer Luftbilder (AHRENS 2001; MÜNCH 1993). Aus diesen abgeleitet, konnten zwei Vegetationshöhenmodelle (normalisierte digitale Oberflächenmodelle) im zeitlichen Abstand von jeweils 21 Jahren und ein drittes aus aktuellen Laserdaten mit nochmaligem 21-jährigen Zeitversatz, erstellt werden (Abb. 4.2-6; 4.2-9; 4.2-18; 4.2-22; 4.2-23; 5-1). Sie gestatteten über die Bestandeshöhe (und Kronenrauigkeit) eine Rekonstruktion der zeitlichen und flächenspezifischen Abfolge der Waldentwicklungsphasen sowie eine Entwicklungsprognose für die kommenden 21 Jahre. Denn: *„Entwicklungen von Wäldern sind komplexe Vorgänge, die zum einen, bedingt durch die hohe Lebenserwartung der Bäume, für menschliches Zeitempfinden sehr langsam ablaufen, und zum anderen aber auch plötzlichen drastischen Veränderungen unterworfen sein können. Walddynamik lässt sich daher nicht direkt messen, sondern wird über einzelne Zustandsgrößen beschrieben, die **räumlich getrennt** oder **zeitlich nacheinander** erfasst werden“*, (MÜNCH 1993, 77).

Das mit dem Entstehen größerer Lücken im Kronendach des Buchenoberstandes am Mittel-Hang Ende der 1960er Jahre begonnene Disintegrations- und Formierungsstadium (Abb. 5-1 (links), der flächige Zusammenbruch des Buchenoberstandes, die kleinflächige Entstehung der Verjüngungskerne (Abb. 5-1, Mitte) sowie ihr nachfolgendes Zusammenwachsen zu großflächigeren, in der Bestandeshöhe homogene Einheiten (Abb. 5-1, rechts), wie von für den *Perlgras-Tieflandbuchenwald* anhand einer unechten Zeitreihe erstmals thesenartig formuliert (JENSSEN & HOFMANN 1996, 118 f.), konnte für die untersuchten drei Buchenwaldökosysteme bestätigt und veranschaulicht werden. Aufgrund der in den letzten 21 Jahren anhand des Vergleichs der Vegetationshöhenmodelle gezeigten Wachstumsgeschwindigkeit ist ein Übergang der Verjüngungskerne von der bisherigen *Raumeroberungsphase* in die *Raumfüllungsphase* (OTTO 2002, 652) und damit ein flächiges Zusammenwachsen aller drei Untersuchungsbestände zu einem frühen Hallenwaldstadium in den kommenden 20 Jahren zu erwarten (Abb. 5-1; Abb. 5-2). Dies zeigt die vorzügliche Eignung der modernen Verfahren der Geoinformatik in der Kopplung mit georeferenzierter terrestrischer Feldarbeit (unter Nutzung von GIS-basierten Felddatenerfassungssystemen, wie z. B. FIELD-MAP) für die Rekonstruktion, Analyse und Prognose der Waldentwicklung. Die georeferenzierte Feldarbeit, gekoppelt mit digitalen Geodaten, wird durch die ab 2018 startende flächige Bereitstellung digitaler Oberflächenmodelle mit 1 m Gitterweite durch die Vermessungsverwaltungen der Länder (Beschluss der AdV auf der 29. Tagung des Arbeitskreises Geotopographie in Lübeck am 6. Juni 2016) für die Rekonstruktion und Prognose von Waldentwicklungsphasen eine neue Qualität bekommen.

Die Definition von Waldentwicklungsphasen in Tieflandbuchennaturwäldern anhand der Kartierung von in Kleinflächen (12,5 m x 12,5 m, die Kronenschirmfläche eines Altbaumes) vorgefundenen Einzelbaum- und Strukturmerkmalen (Totholz, Überhälter, Verjüngung) und Baumdurchmesser, noch dazu losgelöst von der Vorwaldentwicklungsgeschichte (TABAKU 1999, 90 ff.; WINTER ET AL. 2003, 146 ff.), halten einer objektiven Überprüfung nicht stand. Sie unterstellen modellhaft mit einer durchschnittlichen Kronenschirmfläche eines Altbaumes plenterwaldartige Waldverjüngungsgrößen (wie im montanen Buchenurwald) und können die standorts- und vegetationsspezifischen Verjüngungsgrößen nicht abbilden.

Die Grenzen des vielfältige Nebeneinanders von vitalen und absterbenden Bäumen, lebenden Stümpfen und Totholz sowie die sich zwischen den liegenden Stämmen entwickelnden Verjüngungsnester, das das Disintegrations- und Formierungsstadium kennzeichnet (JENSSEN & HOFMANN 2003, 119), lassen sich nicht anhand von „starren“ Kleinstflächen, die der durchschnittlichen Kronenschirmfläche eines Altbaumes entsprechen, von anderen Phasen der Waldentwicklung abgrenzen. Damit bleiben wichtige forstpraktische Anwendungsfragen unbeantwortet. In dieser als *Raumeroberungsphase* (OTTO 2002, 652) bezeichneten Periode der Walderneuerung ist der Kampf um Licht, die Baumhöhe, und da es sich um ein kleinflächiges Verjüngungsgeschehen handelt, die Kleinbestandeshöhe, das entscheidende Abgrenzungskriterium zur Ausscheidung von Waldentwicklungsphasen.

Dem Vorschlag, „*indem nicht Zustände, sondern Veränderungen als Maß für den Entwicklungszustand herangezogen werden, wird ein direkter Weg zur Phasenbestimmung gewählt. Hierdurch wird eine hohe Sicherheit und Eindeutigkeit der Phasenausscheidung erreicht. Allerdings ist das Verfahren auf Zeitreihendaten beschränkt*“ (MEYER 1999, 209), ist unbedingt zuzustimmen. Aufgrund des zwischenzeitlich erfolgten Übergangs vom analogen zum digitalen Bildflug sowie der luftgestützten Laserbefliegung ist ergänzend hinzuzufügen, dass Zeitreihen aus Vegetationshöhenmodellen diese Aufgabe der Waldentwicklungsphasenausweisung in Kombination mit georeferenzierter terrestrischer Feldarbeit übernehmen können.

Vegetationshöhenmodelle, insbesondere aus Laserdaten gerechnete Baumhöhenklassenmodelle mit kleiner/gleich 1 m Rasterweite (Abb. 5-1 rechts), und die daraus durch Zusammenfassung von Höhenklassen auf der Grundlage der Durchmesser-Höhen-Beziehungen der Einzelbäume erstellte Wuchsklassenmodelle bilden die *Raumeroberungsphase* mittels standortsspezifischer Kleinbestandeshöhen objektiv ab, markante Überhälter sind identifizierbar (Abb. 5-2, Tab. 3.2-2). Selbst Lücken im Kronendach sind sichtbar (Abb. 5-2 rechts). Die bevorzugt südliche Ausrichtung der Kronendachlücken im starken Baumholz (Altholz-Hallenstadium), die *Stöckerlücken* (STÖCKER 1996, zit. nach JENSSEN ET AL. 2003, 121) sind erkennbar. Vegetationshöhenmodelle, hergeleitet aus Luftbildern mit 1 m Rasterweite, ermöglichen die sichere Ausweisung von Wuchsklassen, lassen aber nur markante Lücken im Kronendach sichtbar werden (Abb. 5-2 Mitte). Aus Luftbildern noch gröberer Auflösung (> 1,5 m) errechnete Oberflächenmodelle sind zwar Wuchsklassen detektierbar, aber keine kleineren bis mittleren Einzelbaumkronen und Lücken (Abb. 5-2 links).

Durch die Zusammenfassung der in digitaler Form vorliegenden Wuchsklassen können in einem nächsten Schritt die (fast namensgleichen) Waldentwicklungsphasen (Buschiges Jungwuchs- oder Dickungsstadium, Jungbaum- oder Stangenholzstadium, Baum-Hallenwaldstadium sowie Altbaum-Hallenstadium) gebildet werden (Abb. 5-3).

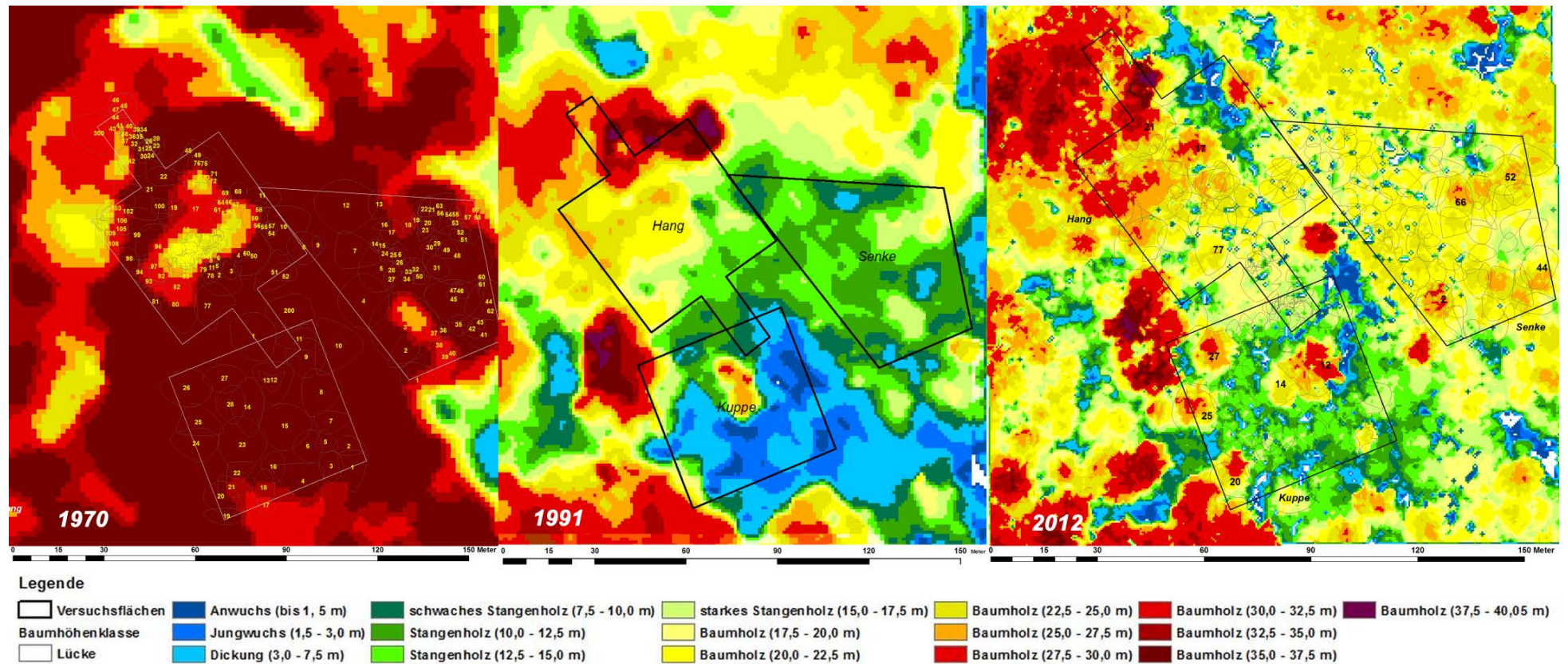


Abb. 5-1: Vegetationshöhenmodelle (links aus dem Jahre 1970, Pixelauflösung 1,6 m) – (Mitte aus dem Jahr 1991, Pixelauflösung 1 m) - (rechts aus dem Jahr 2012, Pixelauflösung 1 m aus Laserdaten) der Untersuchungsflächen im *Faulen Ort*

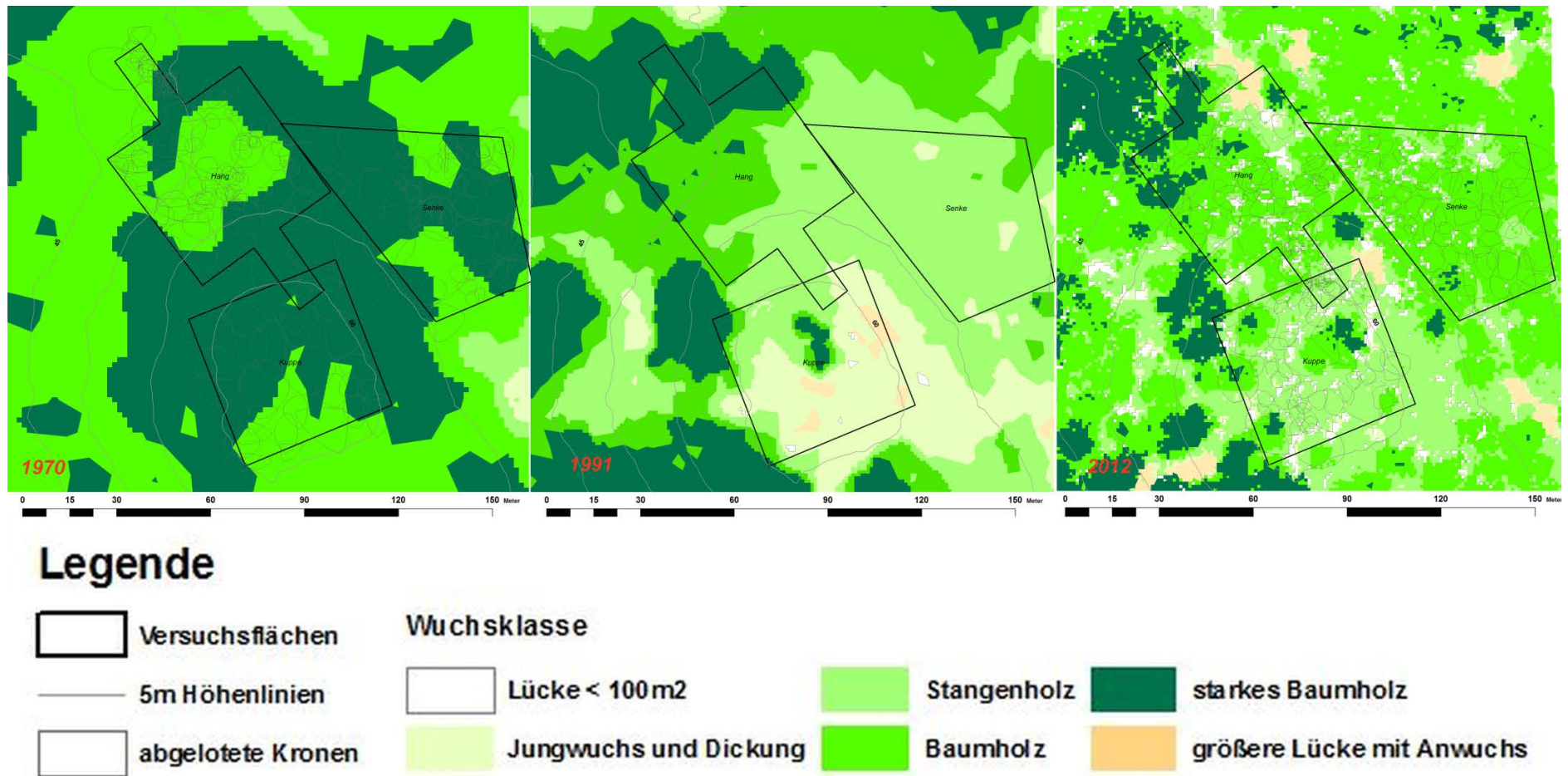


Abb. 5-2: Wuchsklassenmodelle, abgeleitet aus den Vegetationshöhenmodellen (links aus dem Jahr 1970, Pixelauflösung 1,6 m) – (Mitte aus dem Jahr 1991, Pixelauflösung 1 m) – (rechts aus dem Jahr 2012, Pixelauflösung 1 m aus Laserdaten)

Das Disintegrations- und Formierungsstadium ist einem letzten interpretatorischen Schritt durch das enge Nebeneinander der Wuchsklassen Lücke, Lücke mit Anwuchs, Jungwuchs und Dickung sowie starkes Baumholz (Überhälter) mittels Veränderungsanalyse (1970 zu 1991 bzw. 1991 zu 2012) identifizier- und abgrenzbar (Abb. 5-2 und Abb. 5-3, Mitte sowie Ost- und Südhälfte der Kuppe im Jahre 1991).

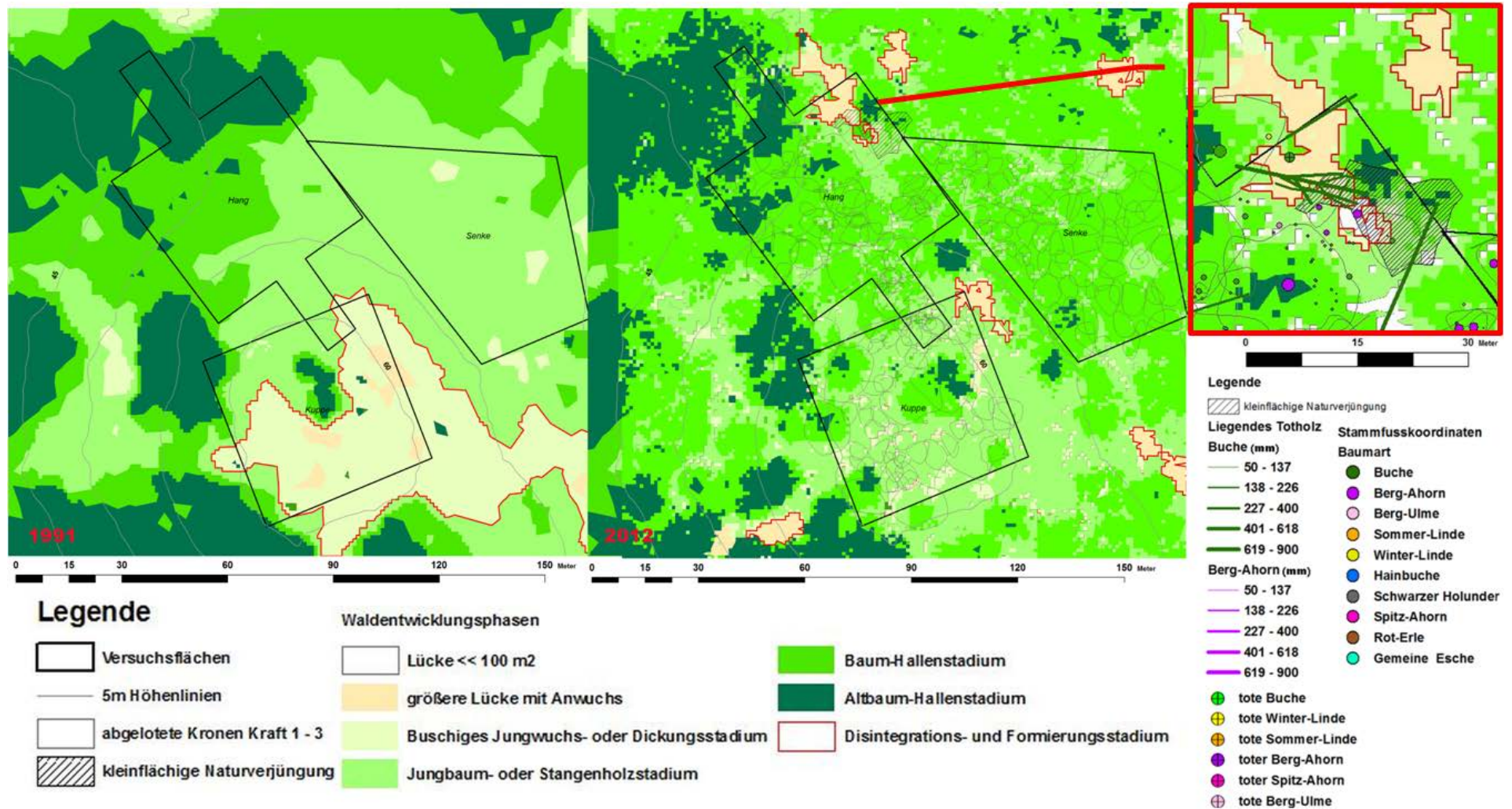


Abb. 5-3: Aus den Veränderungen in den Vegetationshöhenmodellen 1970 bis 2012 abgeleitete Modelle der Waldentwicklungsphasen (linke Bildhälfte 1991; rechte Bildhälfte 2012, mit Bildausschnittvergrößerung und Einzeichnung terrestrischer Inventurdaten)

Über die räumliche Pufferfunktion im GIS lässt sich die räumliche Abgrenzung des Disintegrationsstadiums (des Altbaum-Vorbestandes-) und Formierungsstadiums (des Jungbaum-Folgebestandes) im Vegetationshöhenmodell weiter optimieren und über Veränderungsanalysen zweier zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommener digitaler Luftbilder (change detection) der Software ERDAS IMAGINE PROFESSIONAL automatisieren.



Abb. 5-4: Größere Lücke im Disintegrations- und Formierungsstadium im Norden des *Hangs*, entstanden durch Kronenbruch einer Alt-Buche, Blick vom Schnittpunkt der Flächen *Hang* und *Senke* nach West

Die Anwendung von Vegetationshöhen- und Wuchsklassenmodellen gestattet es, den im Jungwuchs- oder Dickungsstadium zögerlich beginnenden Prozess der zunehmenden *strukturellen Homogenisierung* (erkennbar am Zusammenwachsen von kleinflächigen Verjüngungstrupps und -gruppen zu großflächigeren Jungbeständen einer Baumhöhenklasse) zu veranschaulichen (JENSSEN & HOFMANN 1996, 117; Abb. 5-1; Abb. 5-2 jeweils Mitte und rechts; Abb. 5-3). Ein Vegetationshöhenmodell aus fullwave Laserdaten erlaubt zusätzlich die Möglichkeit der flächenhaften Darstellung des Unterstandes (STRAUB ET AL. 2011, 44 f.; RÜFFER & JÜTTE 2010, 34 f.).

Mathematische Modellierungen (GRIMM & RADEMACHER 2004, 47 ff.), die weder die standörtlich differenzierten Größen der Verjüngungsplots noch deren Zusammenwachsen zu größeren homogenen Einheiten abbilden können (da gegenwärtig unbekannt), sind wenig zielführend. Die ausschließlich terrestrische Kartierung bürgt aufgrund des fehlenden Raum-Zeit-Vergleichs die Gefahr einer künstlich überhöht ausgewiesenen kleinflächigen Vielfalt von (objektiv nicht vorhandenen) Entwicklungsphasen mit all den damit verbundenen naturschutzfachlichen Fehldeutungen.

These 4 *Der Tieflandbuchenwald verjüngt sich in seinem Entwicklungszyklus nicht kontinuierlich, sondern ist auf bestimmte Phasen, dem Disintegrations- und Formierungsstadium (JENSSEN & HOFMANN 1996, 119 f.), beschränkt. Nur die in dieser Entwicklungsphase der Tieflandbuchenwälder einsetzende Verjüngungstätigkeit bietet die Möglichkeit der Etablierung eines neuen, an veränderte Standort- und hier speziell Klimabedingungen angepassten Lebenszyklus des Buchenwaldes.*

Das Disintegrations- und Formierungsstadium umfasst den Zeitraum von der Auflösung des Altbaum-Vorbestandes bis zur flächigen Formierung des Jungbaum-Folgebestandes.

In den seit 1923 nicht mehr bewirtschafteten Untersuchungsflächen im *Faulen Ort* wurden seit der Erstinventur die Waldentwicklungsphasen des Altbaum-Hallenstadiums, Disintegrations- und Formierungsstadiums, Jungwuchs- und Dickungsstadiums, Jungbaum- oder Stangenholzstadiums und die ersten Ansätze des frühen Hallenstadiums festgestellt (Abb. 4.2-1; 4.2-5; 4.2-6; 4.2-8; 4.2-9; 4.2-18; 4.2-20; 4.2-22; 4.2-23; 5-3). Das Zeitfenster für eine erfolgreiche Verjüngungstätigkeit der einzelnen Baumarten hatte sich im Jahre 2012 aufgrund des flächig beendeten Disintegrations- und Formierungsstadiums bereits wieder weitestgehend geschlossen. Lediglich die wenigen noch vorhandenen Überhälter der alten Baumgeneration in den drei Flächen sind gegenwärtig potentielle Räume dieser Phase. Eine größere Lücke, entstanden aus dem Zusammenbruch einer Altbuche, ist gegenwärtig im Norden der Fläche *Hang* noch vorhanden (Abb. 5-1 bis 5-4). Die erfolgreiche Verjüngungstätigkeit blieb in der vorliegenden Untersuchung auf das Stadium der Disintegration und Formierung beschränkt.

Die Ursache hierfür liegt in der zu geringen photosynthetisch aktiven Strahlung in der bodennahen Schicht des geschlossenen Kronendachs der beobachteten Buchenwaldökosysteme im Sommerhalbjahr. Sie ermöglicht zwar das Keimen und den Anwuchs, verhindert aber den erfolgreichen Aufwuchs. Mit den Medianwerten des prozentualen Anteils des DIFFSF in allen untersuchten Höhenklassen von 12 % bis 13,5 % der Freiflächenstrahlung, wurde die von BURSCHEL & HUSS (1964) in Beschattungsexperimenten festgestellte Schwellgrenze für ein positives Höhenwachstum der Buche von 20 % relativer Beleuchtungsstärke deutlich unterschritten (Abb. 4.5-7). Die von BURSCHEL UND SCHMALZ (1965, 200 ff.) gezogene Grenze von 10 % relativer Beleuchtungsstärke bei der mit Kümern und möglicherweise Vergehen der Jungbuchen zu rechnen ist, wird in weiten Teilen der *Senke*, des *Hangs* und im Südwesten der *Kuppe* (Stangenholz) nur knapp überschritten (Abb. 4.5-6). Dieser Schwellwert wird auch in neueren Untersuchungen u. a. durch die Zunahme plagiotropher Buchenpflanzen „vorsichtig bestätigt“ (GRALLA ET AL. 1995, zit. nach WAGNER ET AL. 1997, 21 f.; HAUSKELLER-BULLERJAHN, 1997, 112).

In den lichtökologischen Untersuchungen konnte eine tendenzielle Zunahme des DIFFSF von der Kleinstlücke über die Stangenholz- bis zu der Baumhöhenklasse [20–22,5 m] festgestellt werden. In derselben Reihenfolge nehmen der DIRSF und TOTSF statistisch signifikant zu. In Kleinstlücken, umgeben von Stangenholz oder Dickungsstadien, sind demzufolge die ungünstigsten lichtökologischen Bedingungen gegeben, die mit dem Aufwachsen der Lückenumgebung in Baumholzdimensionen tendenziell besser werden. VON LÜPKE (1995) präzierte die für ein erfolgreiches Aufwachsen der Buche erforderliche Lückengröße bei einer Bestandeshöhe von 30 m bis 36 m mit größer 25 m Radius ($> 500 \text{ m}^2$) (Tab. 4.5-13). Somit ist lichtökologisch zu schlussfolgern, dass der natürliche Tieflandbuchenwald durchaus zyklisch wiederkehrende Naturverjüngungen aufweisen kann,

dessen erfolgreicher Aufwuchs aber auf das Entstehen großer Lücken ($> 500 \text{ m}^2$) infolge des Zusammenbruchs mehrerer Buchen im Disintegrations- und Formierungsstadium angewiesen ist. Das Disintegrationsstadium wird durch flächig auftretende Lücken am Ende des Altbaum-Hallenstadiums eingeleitet, die vorwiegend eine Nord-Süd-Ausrichtung besitzen (STÖCKER 1996, zit. nach JENSSEN ET AL. 2003, 121). Diese Lücken können aufgrund ihrer Größe vom umgebenen, überalterten Buchenbestand (im Gegensatz zum vorherigen Baum-Hallenstadium) nicht mehr geschlossen werden (Abb. 4.2-5; 4.2-6; 4.2-18). Infolge Sonnenbrands und nachfolgender Pilzinfektion an den besonnten Buchenstämmen werden diese schnell größer. Wie die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, eröffnen sie ein Zeitfenster für die Etablierung neuer, an veränderte Standortbedingungen angepasste Baumartenmischungen (Abb. 4.2-1; 4.2-5; 4.2-6; 4.2-8; 4.2-18; 4.3-1). Als Zeitpunkt für das Einsetzen des Disintegrations- und Formierungsstadiums, der stark auch vom Zufall beeinflusst wird, konnten für den *Perlgas-Buchenwald* ein mittleres Bestandesalter von ca. 260 Jahren ermittelt werden (JENSSEN & HOFMANN (2003, 117). Für den *Bingelkraut-Buchenwald* des *Hangs* und den *Eschen-Buchenwald* der *Senke* konnte als Startpunkt des Disintegrations- und Formierungsstadiums (Mitte der 1960er Jahre) ein mittleres Bestandesalter von ca. 230 Jahren beobachtet werden. Im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der *Kuppe* begann dieses Waldentwicklungsstadium, durch zwei Orkane Mitte der 1970er Jahren initiiert, zeitlich verzögert mit etwa 240 Jahren (Kap. 2.3; Kap. 4.2.3; Kap. 4.2.4; Abb. 4.2.24).

These 5: *Diese Gruppen-Anfangsphase des neuen Zyklus wird durch intraspezifische Konkurrenzbeziehungen (weniger durch interspezifische) dominiert, in der sich in der Gruppe die vitalsten Exemplare durchsetzen, bevor sie in die interspezifische Auseinandersetzung um die Dauerphasenstruktur einwachsen. Diese anfangs homogenen Gruppenstrukturen, mit denen auch seltene Baumarten aufwachsen (so bspw. Elsbeere, Sommer-Linde, Feld-Ahorn) bieten diesen die Möglichkeit der Einwanderung und Etablierung in solche Waldgesellschaften, in denen zur Massenbildung neigende Baumarten (Buche, teils auch Hainbuche) die Waldstruktur dominieren.*

Aufgrund der in der Wiederholungsinventur zu beobachtenden kleinflächigen baumartenreinen Gruppenstrukturen, ist zunächst von einem innerartlichen Kampf um Licht in der Raumeroberungsphase auszugehen (OTTO 2002, 651; Abb. 4.2-8; 4.3-1). Seltene Baumarten, wie die Sommer-Linde, perspektivisch der Feld-Ahorn oder die Elsbeere, können sich etablieren aufgrund der eingeschränkten Konkurrenzkraft der Buche in reliefbedingt trockenen Lagen auf karbonathaltigen, anhydromorphen Standorten, die das Areal des Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldökosystem bilden. Entscheidend ist ihr Vorhandensein als genügend großes Samenpotential zum Zeitpunkt der großflächigen Lückenbildung im beginnenden Disintegrations- und Formierungsstadium. Die vitalsten Individuen der jeweiligen Baumart setzen sich durch. Die innerartliche Gruppenstruktur bietet Schutz vor einer etwaigen konkurrenzstärkeren Baumart, ähnlich dem von BILKE (2004) beschriebenen Prinzip der Eichenvorverjüngung in Morzfeldschen Löchern von Buchenbeständen. Erst im Prozess des später einsetzenden Zusammenwachsens der baumartenreinen Kleingruppen zu größeren Beständen, eng verknüpft mit dem Prozess der Raumfüllungsphase (OTTO 2002, 652), treten die Baumarten untereinander in Konkurrenz (vgl. Abb. 4.2-22 mit 4.2-23).

These 6: *Die Vielfalt der Erscheinungsformen des Naturwaldes (z. B. Sonderstrukturen, Totholzangebot, Schichtigkeit, Verjüngungsdynamik, Vegetationszusammensetzung) unterliegen einer natürlichen Dynamik, sie sind nur durch die genaue Kenntnis des Bio- und*

Geopotentials, wie der daraus ableitbaren potentiell natürlichen Waldgesellschaft als Ausdruck des gesamten Standortspotentials und der Wald- bzw. Forstwirtschaftsgeschichte (als Startpunkt der Waldentwicklung) zu verstehen und zu bewerten.

Alle Erscheinungen im Wald unterliegen einer natürlichen Dynamik, die es zunächst unter der Berücksichtigung der Forstwirtschaftsgeschichte zu ergründen gilt. Neben den bereits erwähnten Waldentwicklungsphasen soll dies exemplarisch an der Totholzdynamik verdeutlicht werden:

Die georeferenzierte Arbeitsweise machte es möglich, den bis zum Jahre 2012 fast vollständigen erfolgten Zusammenbruch des Altbestandes, dessen Zersetzung und Mineralisierung aufgrund vorhandener Stammlagepläne und Klupplisten zu quantifizieren sowie die Auswirkungen auf den Oberboden des Kalkbuchenwaldes zu untersuchen. Hochgerechnet sind in den letzten vier Jahrzehnten durch das bis 2012 erfolgte Absterben und die nachfolgende Zersetzung der dort im Jahre 1958 bzw. 1968 vorhandenen Altbäumen mit dem einzelbaumweise geschätzten oberirdischen Vorrat (anhand der Durchmesser- und Höhenwerte der Erstinventuren) insgesamt

- 141 t Kohlenstoff und 446 kg Stickstoff je Hektar auf der *Kuppe*,
- 59 t Kohlenstoff und 204 kg Stickstoff je Hektar am *Hang*, sowie
- 220 t Kohlenstoff und 669 kg Stickstoff je Hektar in der *Senke*

freigesetzt worden. Innerhalb von weniger als vier Jahrzehnten konnten diese Stoffmengen abgebaut werden.

Tab. 5-1 gibt den Rückgang der Stammzahlen des Altbestandes (nur Baumholzdimension) und der Vorräte durch Totholzabbau zwischen der Erst- und Wiederholungsinventur wieder.

Tab. 5-1: Dynamik im Abbau und der Zersetzung des Altbestandes der drei Flächen

	Kuppe		Hang		Senke	
Erstinventur	1958		1968		1958	
[n] Bäume	28	112/ha	109	363/ha	63	267/ha
[n] Bäume (nur Baumholz)	27	108/ha	21	70/ha	22	79/ha
Vorrat Baumholz		733 Vfm		386 Vfm		704 Vfm
(Derbholz/ha)						
Liegendes Totholz		k. A.	15,8 m ³	52,5 m ³ /ha		k. A.
Stehendes Totholz		k. A.	12,6 fm	41,8 fm/ha		k. A.
Wiederholungsinventur	2012		2012		2012	
Liegendes Totholz	8,2 m ³	32,8 m³/ha	21,0 m ³	70,1 m³/ha	21,1 m ³	75,5 m³/ha
Stehendes Totholz	9,2 fm	37,0 fm/ha	26,4 fm	88,1 fm/ha	8,3 fm	29,8 fm/ha
(Derbholz)						
[n] Altbäume	9	36/ha	8	27/ha	4	14/ha
(Vorrat der Altbäume/ha ²⁸)		(250 Vfm)		(66,4 Vfm)		(70,6 Vfm)
Abgebaute Holzvorrat		483 m³/ha		256 m³/ha		528 m³/ha
je Jahrzehnt (1972–2012)		121 m ³ /ha		64 m ³ /ha		132 m ³ /ha

²⁸ zum Zeitpunkt der Erstinventur

Im Zeitraum 1972–2012 konnte je Jahrzehnt eine vollständige mineralisierte Totholzmenge von 64 m³/ha am *Hang*, 121m³/ha auf der *Kuppe* und 132 m³/ha in der *Senke* beobachtet werden. Angenommen, diese Geschwindigkeit im Abbau des starken Baumholzes würde sich gleichmäßig fortsetzen, so wären in spätestens zwei Jahrzehnten (der anhand der Höhenentwicklung prognostizierte Zeitpunkt der flächigen Ausbildung des *beginnenden Baum-Hallenstadiums*) das naturschutzfachlich als so überaus wertvoll angesehene Starkholz und dessen Sonderstrukturen weitestgehend verschwunden. Das Totholzaufkommen unterliegt demzufolge natürlichen, phasenabhängigen Schwankungen.

Im Unterschied zu borealen Ökosystemen führte der vollzogene Totholzabbau auf den Kalkstandorten langfristig zu keiner schlechteren Humusform und zu keiner für das Ökosystem schädlichen Biomasseanhäufung (KUUSELA 1990)²⁹. Die mit dem Disintegrations- und Formierungsstadium einhergehende Auflichtung brachte eine enorm gesteigerte Bodenaktivität hervor, erkennbar an der Etablierung des Großstrauches Schwarzer Holunder und nachfolgend der Berg-Ulme (Abb. 4.4-2).

Für den Nachweis des Stoffeintrags aus dem Totholz in den Oberboden stellen sich aufgrund des erkannten Mechanismus des Einzelbaumzusammenbruchs ganz besonders hohe Anforderungen an die zeitlich-räumlichen Veränderungsdokumentationen (Abb. 4.4-6). In der Gesamtbilanz der Stoffeintragsuntersuchung durch Buchentotholz ist anzumerken, dass auf den eutrophen, kalkhaltigen Buchenwaldstandorten im Nordostdeutschen Tiefland die Zersetzung von starken Buchen einen geringen Einfluss auf den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt des Oberbodens der Tiefenstufe 0–5 cm hat. Den diesbezüglichen Beobachtungen im Kalkbuchenwald des Hainichs, die einen geringen Unterschied in der organischen Bodenkohlenstoffkonzentration unter Totholz und der Kontrolle feststellten, ist zuzustimmen (KAHL 2008, 65). Ebenso wie der im Luzulo-Fagetum des Solings abschließend gezogenen Schlussfolgerung, dass die „*im Vergleich zu der Menge der im lebenden Bestand und im Auflagehumus gespeicherten Nährstoffe [...] die N-Vorräte im Totholz eine untergeordnete Rolle [spielen, Anm. d. Verf.]*“ (MÜLLER-USING & BARTSCH 2007, 21). Dies kann sich in den sorptions- und nährstoffärmeren Buchenwaldökosystemen auf Sandstandorten des Nordostdeutschen Tieflands ganz anders verhalten.

Das oben angeführte Beispiel soll verdeutlichen, dass erst die ganzheitliche Betrachtung die Möglichkeit erlaubt, von der Vielfalt der Erscheinungen der Vegetation, des Standortes sowie der im Boden stattfindenden Prozessabläufe auf den Bestand und dessen Wachstums- und Zersetzungsprozesse sowie deren Rückkopplungen zu schließen. Nur auf diese Weise gelingt es zum Wesen der Dinge vorzudringen. Dies entspricht dem Prinzip der historisch in Eberswalde als *Waldkunde* bezeichneten Ökosystemforschung, der es im Kern darum geht, „*den Wald in seinen verschiedenen natürlichen Formen, in seiner natürlichen Verbreitung und in seiner Abhängigkeit von der Umwelt, den sog. Standortsfaktoren, zu erforschen und richtig verstehen zu lernen. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen der ursächlichen Zusammenhänge von Wachstum und Gedeihen des Waldes mit den standörtlich gegebenen Lebensbedingungen lässt sich erst eine richtige Beurteilung unserer technischen Maßnahmen im Wald gewinnen*“ (DENGLER 1935, 5).

²⁹ Aufgrund der niedrigen Temperaturen im borealen Nadelwald (Temperatur als Minimumfaktor) kommt es zu einer enormen Anhäufung an oberirdischer Biomasse. Der Abbau dieser Biomasse nach Jahrzehnten der Akkumulation durch periodisch auftretende Forstfeuer schafft neben der Zerstörung des Unter- und Zwischenstandes die Voraussetzungen für die Keimung der neuen Waldgeneration.

Beginnend im Jahre 1955, ist in Eberswalde in den letzten 50 Jahren das Konzept der Wald- und Forstökosysteme als den standortkundlichen, prozessökologischen, vegetationsstrukturellen und waldwachstumkundlichen Einheiten der Waldvegetation erarbeitet worden (HOFMANN & POMMER 2013, 26.). Erste Arbeiten hierzu wurden in den 1950er und 60er

Jahren veröffentlicht (PASSARGE 1958, 302 ff.; SCAMONI & PASSARGE 1959, 386 ff.; PASSARGE & HOFMANN 1964, 913 ff.; HOFMANN 1964, 641 ff.) Diese stellen, aufbauend auf dem Modell der Waldtypen der finnischen und russischen Vegetationsschulen (CAJANDER 1922, 1930; MOROZOV 1949, SUKATSCHEW 1950, 1954), ergänzt um den erkannten Charakter ökologischer Grundeinheiten (der Ökotope – SCHMITHÜSEN 1960), deren schöpferische Anwendung zur Typisierung der baumartenreicheren Vegetation im nordostdeutschen Tiefland dar. Mit den Waldökosystemtypen gelang es erkenntnistheoretisch aus dem vielfältigen in der Natur vorhandenen Puzzle der Erscheinungsformen des Standorts, der Vegetation und darauf stockenden Waldbestandes die ganz bestimmte Standorts-, Vegetations- und Bestockungsform als eine Einheit herauszufiltern, zu definieren und mit der *ökologischen Fahrinne* (SCHWARZENBACH 1987) ihren dynamischen Charakter zu erfassen.

In der vorliegenden Arbeit konnten drei sich ohne aktives Zutun des Menschen in einem neuen Waldzyklus auf engstem Raum herausgebildete Waldökosysteme, der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald*, der *Bingelkraut-Buchenwald* sowie der *Eschen-Buchenwald*, identifiziert und untersucht werden, die sich, wie gezeigt werden konnte:

- in der Bestandestruktur, (Baumartenzusammensetzung und Baumartenanteile (Abb. 4.2-8, 4.3-1) baumartenspezifische genetische Ausstattung der jeweiligen Population (Tab. 4.6-5; 4.6-8)
- in den wuchsbestimmenden ökologischen Faktoren, (der Kalktiefe und Bodennährkraft (Abb. 4.1-1, 4.3-3, Tab. 4.3-10 und 4.3-11); dem pH_{KCl}-Wert (Tab. 4.3-6 und 4.3-10); der Luft- und Bodenfeuchte sowie Wärme (Tab. 22-26); dem Strahlungshaushalt, DIFFSF, DIRSF, TOTSF (Abb. 4.5-5; Tab. 4.5-5 bis 4.5-7)
- und in den Prozessabläufen (inter- und intraspezifische Konkurrenz (Abb. 4.2-14 bis 4.2-17, Tab. 4.4-11); tendenziell im Gesamtstickstoffgehalt des Oberbodens (Tab. 4.3-6 bis 4.3-9)

voneinander abgrenzen lassen.

Diese erkannten Merkmalskonfigurationen werden als *ökologisch-ökonomische Fahrinnen* bezeichnet (HOFMANN & POMMER 2013, 26), die den Rahmen der natürlichen Dynamik der Erscheinungen des betreffenden Wald- und Forstökosystems definieren. Damit wurde versucht, der Forderung DENGLEERS zur Identifizierung des standortsgemäßen Waldtypes zu entsprechen (DENGLER 1935, 5).

Zu ihrer Identifizierung ist es notwendig, ausreichend große Versuchsflächen auf möglichst homogener standorts- und vegetationskundlicher Grundlage auszuwählen, wie es bei der Versuchsflächenanlage der drei Flächen *Hang*, *Kuppe* und *Senke* praktiziert wurde. Nur sie gewährleisten den hinreichend großen Ausschnitt der Lebensgemeinschaft Wald, um das Waldökosystem in seinen vier Dimensionen (X, Y, Z sowie dem zeitlichen Aspekt) unter Nutzung der unmittelbaren, vermittelten, direkten und indirekten Beobachtung im Rahmen des wissenschaftlichen Monitorings untersuchen zu können. Denn: „Ziel der Forschung in

Naturwaldreservaten ist [...] das Nachzeichnen von ökologischen Zusammenhängen und Abläufen in naturnah aufgebauten Wäldern bzw. die Erforschung ungestörter Entwicklungen. Über die Methode der Dauerbeobachtung (Mittel) soll dieses Ziel mit Hilfe des Objektes Naturwaldreservat realisiert werden“ (MÜNCH 1993, 77).

Da es sich bei Wäldern in erster Linie um Vegetationstypen handelt (DENGLER 1935, 1), sollte die homogene Versuchsfläche eine Mindestgröße der maximalen Baumhöhe zum Quadrat haben. Eine Flächengröße von 50 m x 50 m wäre ideal. Das erleichtert im Gegensatz zu vielen kleinen Flächen den Georeferenzierungsaufwand und macht eine Nutzung von Fernerkundungsverfahren erst sinnvoll.

Diese dem „Kernflächenkonzept“ (AKCA ET AL. 1993, 7) entsprechende Arbeitsweise ist sehr zeitintensiv und nur auf wenigen Einzelflächen je Naturwald durchführbar. Zudem steht es scheinbar im Widerspruch zu dem Anliegen, die Entwicklung der Naturwaldzellen nach Möglichkeit auf der gesamten Fläche und für unterschiedliche Ebenen des Ökosystems zu untersuchen und zu dokumentieren (Albrecht 1988; zit. nach AKCA ET AL. 1993, 7).

Die georeferenzierte Arbeitsweise unter Nutzung von Außendienstvermessungs- und Visualisierungssystemen (z. B. FIELD-MAP) erlaubt jedoch durch die Verschneidung der für den betreffenden Naturwald digital vorhandenen Geodaten (geologische Karte, historische Karten, Datenspeicher Wald, Standortskarte, digitales Geländemodell, historische und aktuelle RGB(I) Luftbilder und daraus errechnet dem digitalen Vegetationshöhenmodell) im GIS vor der Flächenanlage einen antizipativen Überblick über die vorhandenen standörtlichen Bedingungen. Davon abgeleitet und durch Waldinformationssystemdaten (DSW) gestützt, sind die wahrscheinlichen vorkommenden Waldökosystemausprägungen und deren Lage in der Fläche darstellbar und können als Suchflächen für die Repräsentativaufnahmen ausgewählt werden. Durch Übernahme der vorausgewählten Geodaten in ein Außendienstvermessungs- und Visualisierungssystem ist es möglich, diese Suchflächen in der Feldarbeit zeitlich sehr effektiv zu validieren und anschließend zu bearbeiten. Systematisch verteilte Stichprobenkreise können als Ergänzung beispielsweise für ertragskundliche Inventuren (HOBI ET AL. 2015) oder der Erfassung von Sonderstrukturen (vorzugsweise auf regionaler Ebene) dienen. Der Aufwand für ihre hinreichend genaue Georeferenzierung für die spätere Nutzung digitaler Daten ist gegenwärtig noch unvertretbar hoch. Systematisch verteilte Stichprobenkreise mit typischen Flächengrößen von 314 m² bis 1000 m² sind für vertiefende ökosystemare Untersuchungen aufgrund ihrer

- für eine hinreichend genaue Bestimmung der Vegetationsvielfalt,
- der genetischen Diversität,
- der Erfassung der waldwachstumskundlichen Konkurrenzbeziehungen (beispielsweise unter Nutzung von digitalen Karten, Luftbildern, Gelände- und Oberflächenmodellen) und
- der Aufdeckung der Beziehungen des Ökosystems untereinander zu kleinen Flächengröße

nur bedingt geeignet.

Was unterscheidet die drei untersuchten Kalkbuchenwaldökosysteme des Tieflandes von denen des Bergland-Buchenwaldes? Gibt es darüber hinaus Unterschiede zu anderen untersuchten Tiefland-Buchenwäldern?

Der sichtbarste Unterschied zwischen den Tiefland-Buchenwäldern und den Bergland-Buchenwäldern der collinen und montanen Höhenstufe und zugleich Ergebnis der unterschiedlichen vegetationswirksamen Klimafaktoren (erhöhter Niederschlag und Feuchte sowie kühlere Temperaturen im Bergland) besteht in den beteiligten Mischbaumarten: Im Unterschied zum Tiefland-Buchenwald mit (bis auf die Wald-Kiefer) ausschließlich sympodialen Laubbaumarten sind in den Bergland-Buchenwäldern mit der Gemeinen Fichte und Weiß-Tanne schattenertragende monopodiale Nadelbaumarten beigemischt. Diese sind in der Jugendphase schattenertragender als die Buche, da sie im Halbschatten, im Gegensatz zu ihr, nicht die Fähigkeit der Ausbildung einer senkrechten Stammachse verlieren (SCHÜTZ 2001, 67). Sowohl Einzelbaumverjüngungen (als auch kleinflächige Beimischungen) beider Nadelbaumarten sind möglich, was eine höhere natürliche Strukturvielfalt (insbesondere die vertikale) im Bergland-Buchenwald im Vergleich zum Tiefland-Buchenwald ermöglicht. SCHÜTZ (2001) fasst das in Bezug auf die Fichte wie folgt zusammen: *„Im übrigen besitzt diese Baumart einige sehr bemerkenswerte Eigenschaften: sie kann den zur Verfügung stehenden Wuchsraum hervorragend ausnutzen, sie besitzt eine ausgeprägte axiale Dominanz, sie erträgt gut Beschattung und leistet damit einen wertvollen Beitrag zu deutlicher Strukturdifferenzierung“* (SCHÜTZ 2001, 55). Gleiches gilt für die Weiß-Tanne. Die Nadelbaumarten lassen im Vergleich zur Buche mehr Licht auf den Waldboden. Im Extremfall sind in der gemischten montanen Tannen-Buchen-(Fichten-)Waldformation in Urwäldern strukturreiche *Plenterphasen* zeitweilig auf bis zu 14 % der Waldfläche möglich (MAYER ET AL. 1980, SCHREMPF 1986, zitiert nach SCHÜTZ 2001, 32).

In den *Tiefland-Buchenwäldern* fehlen diese (vertikal)-strukturbildenden Nadelbaumarten von Natur aus. Temporär sind horizontale und vertikale Strukturen nur im Disintegrations- bis vollendeten Formierungsstadium, der Anfangsphase der Walderneuerung, mit kleinflächigen, trupp-, gruppen- bis horstweise Verjüngungsgruppen der Buche (und ihrer potentiellen standortabhängigen Mischbaumarten) vorhanden. Sie bestimmen das Anfangsbild der Walderneuerung. Diese Verjüngungsgruppen „Patchiness“ (SCHÜTZ 2001, 25) wachsen innerhalb weniger Jahrzehnte im Kampf um das Licht (OTTO 2002, 651) zu einer homogenen Kronenschicht zusammen, die *„Waldstrukturen [werden] zunehmend homogener [...] und das Kronendach [...] schließt [sich]“* (SCHÜTZ 2001, 22). Dies umschreibt den Prozess der zunehmenden *strukturellen Homogenisierung* (JENSSEN & HOFMANN 1996, 117). Aufgrund der im Vergleich zum Bergland-Buchenwald vergleichsweise geringen Reliefenergie und standörtlichen Homogenität der pleistozänen Waldstandorte sind die Verjüngungsgruppen des Tiefland-Buchenwaldes tendenziell größer. In Küstennähe des ostdeutschen Tieflandes befindet sich die Buche in ihrem (neben dem Bergland) zweiten Standorts- und Wuchsoptimum. Weiter im Landesinneren auf einem von Nordwest nach Südost verlaufenden Gradienten kommt es bei abnehmenden Niederschlägen und zunehmender Wärme zu verringertem Wachstum sowie zu Ausfällen im natürlichen Verjüngungsgeschehen der Buche (Abb.2.2-1). Insbesondere auf die sensible Jugendphase der Buche wirken die hier regelmäßig auftretenden Trockenjahre und Frühjahrstrockenperioden negativ ein. Diese klimatisch bedingte verringerte Konkurrenzkraft der Buche führte in der Großklimaregion β der forstlichen Klimastufe *mäßig trocken* zur Ausbildung *echter Buchen(laub)mischwälder* (HOFMANN & POMMER 2004, 1211f.). Die am Waldaufbau beteiligten Mischbaumarten unterscheiden sich trophiebedingt (HOFMANN 2014, 43). Innerhalb der Tiefland-Buchenwälder ist mit abnehmender Trophie und Reliefenergie in der Abfolge der Kalk-, Lehm- und Sand-Buchenwälder von einer Zunahme der Flächigkeit der (horizontalen) Strukturen (der Textur) auszugehen (JENSSEN & HOFMANN 1996, 121 f.).

These 7: *Das Studium der natürlichen Verjüngungsabläufe liefert Beispiele und wird Ratgeber für eine standortgerechte und zugleich naturnahe Waldbewirtschaftung, die Naturschutzanliegen integriert, wie zum Beispiel die ökologisch fundierten Gruppen – Wiedereinbürgerung von seltenen Baumarten wie Elsbeere, Sommer-Linde, Feld-Ahorn, Berg-Ulme in entsprechende Waldentwicklungsstadien des Buchenmischwaldes. Die gewonnenen Ergebnisse werden zur Grundlage der Eichung von Naturschutzstandards, so zum Beispiel der Bewertung von Erhaltungszuständen von Buchen-FFH-Lebensraumtypen.*

Waldbauliche Schlussfolgerungen

Die natürliche Verjüngung in den Kalk-Buchenwäldern im Nordostdeutschen Tiefland setzt erst, wie gezeigt werden konnte, im mittleren Bestandesalter von ca. 230 Jahren ein, obwohl sie ab einem Bestandesalter von 60–80 Jahren fruktifizieren (Kap. 2.3; Kap. 4.2.3; Kap. 4.2.4). Dies steht offensichtlich im Zusammenhang mit der bis zu diesem Alter vorhandenen Kronenplastizität der Buche (Abb. 4.2-24). Die Verjüngung der ursprünglich von der Buche dominierten Waldbestände erfolgte sowohl durch die Buche als auch die beteiligten Mischbaumarten standortspezifisch trupp- bis gruppenweise. Sie startete zunächst als inselartige Kleinfläche(n) am Unter- bis Mittelhang (Abb. 4.2-1), die über einen Zeitraum von etwa 40 Jahren zu einer zusammenhängenden großflächigen Verjüngungsschicht zusammenwuchs(en) (Abb. 4.2-18; Abb.4.2-22; 4.2-23). Das wirft die waldbaupraktische Frage nach längeren Bewirtschaftungs- und Verjüngungszeiträumen in den Kalk-Buchenwäldern auf, denn auch die dem natürlichen Ablauf nachempfundene Steuerung der Waldverjüngung im Wirtschaftswald ist ein wichtiger Beitrag zur langfristigen Sicherung der Anpassungs- und Entwicklungsfähigkeit der Wälder (JENSSEN & HOFMANN 2003, 44).

Beim Wechsel in den neuen Lebenszyklus des Buchen(misch)waldes hatte der Berg-Ahorn eine Initialfunktion inne. Er bildete, das vorhandene Lückenangebot nutzend, erste Verjüngungszellen. Die anderen Baumarten verjüngten sich zeitlich versetzt unter und neben den Ahornverjüngungszellen. Dies eröffnet waldbauliche Optionen und zeigt auf, dass die Angst vor der „Verahornung“ auf vergleichbaren Standorten unbegründet ist. Der Berg-Ahorn ist ein natürliches Element des Kalkbuchenwaldes mit Pioniercharakter. Die Konkurrenzverhältnisse zwischen den Baumarten werden durch das reliefbedingte Kleinklima und Wasserdargebot geregelt.

Wie herausgearbeitet wurde, nutzt jede der untersuchten Hauptbaumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie der Berg-Ahorn in den Untersuchungsflächen bevorzugte Verjüngungsstandorte, die sich zwischen den anhydromorphen und hydromorphen Waldökosystemen nochmals unterscheiden können. Daraus lässt sich waldbaulich ableiten, dass die Verjüngung der Buchenmischwälder in der *β-Großklimaregion* kleinflächig erfolgen sollte, wenn ein naturnaher Waldbau angestrebt wird. Der Großschirmschlag als großflächiges Walderneuerungsverfahren bewirkt ein künstlich erzeugte Zeitraffer, in dessen Folge zu Massenbildung neigende Baumarten wie Buche und Hainbuche begünstigt, seltende Mischbaumarten, wie Sommer-Linde, Spitz-Ahorn, Feld-Ahorn und die Elsbeere, jedoch unterdrückt werden (Abb. 5-5).

Bei der Baumartenwahl als auch bei nachfolgenden Durchforstungen sind in der *β-Großklimaregion* Mikrorelief, Exposition, Hangneigung und Hangposition zu berücksichtigen. Dies setzt die Kenntnis des dort vorhandenen Mikroklimas sowie der Bodenfeuchteunterschiede und deren Wirkung auf das Wachstum der jeweiligen Baumart

voraus. Auf grundwasserfernen jungpleistozänen Waldstandorten des nordostdeutschen Tieflandes könnte die kleinflächige Walderneuerung in dieser Klimaregion als langfristiges Nebeneinander von Baumarten standörtlich differenziert unter Ausnutzung des Mikroreliefs bei der Baumartenwahl wie folgt erfolgen (HOFMANN 2014, 43):

- **Auf Mull-Pararendzina, Kalklehm-Rendzina, Deckkalklehm-Rendzina, Tieflehm-Fahlerden und Fahlerden der Standortgruppe R₂.**
Baumartenmischungen: *vorherrschend* Buche, Hainbuche, Winter-Linde, *beigemischt* Sommer-Linde, Elsbeere, Feld-Ahorn, Berg-Ahorn, Spitz-Ahorn, Flatter-Ulme, Berg-Ulme, Esche, Wild-Birne, Vogel-Kirsche, Wild-Apfel (Beispielbestände: *Fauler Ort* Abt. 2).
- **Auf Bändersand-Braunerden und Tieflehm-Fahlerden der Standortgruppe K₂.**
Baumartenmischungen: *vorherrschend* Buche, Hainbuche, Trauben-Eiche, Winter-Linde, *beigemischt* Elsbeere, Flatter-Ulme, Wild-Apfel (Beispielbestände: Liepe Abt. 15a⁷ (STÄHR & WEIß 2006, 97 ff.) und Ruppiner Schweiz Abt.5318 (RÜFFER 2007, 71 ff.)).
- **Auf bodensauren Sand-Braunerden der Standortgruppen Z₂ bis M₂**
Baumartenmischungen: *vorherrschend* Buche, Trauben-Eiche, *beigemischt* Wald-Kiefer, Sand-Birke, Eberesche (Beispielbestand: Zechliner Buchheide Abt.6368 (RÜFFER 2007, 74 ff.)).



Abb. 5-5: Feld-Ahorn (Baumholzdimension) natürlicher Bestandteil des *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwaldökosystems* 250 m nördlich der Flächen

Die Bestandeszieltypen auf entsprechenden Standorten dieser Großklimaregion sollten diesbezüglich ergänzt werden. Ein auf mehrere Jahrzehnte angelegter Femelschlagbetrieb, der mit kleinen über die Fläche verteilten Gruppenhieben beginnt, diese sukzessive in Abhängigkeit des Wachstums der Verjüngung bevorzugt in Nord-Süd-Richtung erweitert und mit weiteren Trupp- und Gruppenhieben ergänzt, bis die einzelnen Verjüngungszentren flächig zusammen gewachsen sind, dürfte am ehesten den in der Natur beobachteten Regenerationsabläufen entsprechen. Nur unter diesen Voraussetzungen lassen sich in der *β-Großklimaregion* erfolgreich gesunde und stabile Waldbestände begründen und die Anpassungsfähigkeit der Waldbestände gewährleisten, die unter dem Begriff des „*klimaplastischen Waldes*“ Eingang in die forstliche Literatur fanden (JENSSEN & HOFMANN 2009, 5 ff.).

Naturschutzfachliche Folgerungen

Bisherige naturschutzfachliche Forderungen in der Bewirtschaftung der Tiefland-Buchenwälder auf Bestandesebene (WINTER ET AL. 2003; WINTER 2005; WINTER ET AL. 2015)

beschränken sich weitestgehend auf beobachtete temporäre (*phasenabhängige*) und naturschutzfachlich wertvolle Erscheinungsformen der Waldstruktur *des Buchenwaldes* an sich. Darunter sind in erster Linie das liegende und stehende Totholz sowie das Altholz mit Nisthöhlen und anderen Sonderstrukturen zu verstehen. An diese typischen Requisiten längere Zeit unbewirtschafteter Tieflandbuchenwälder in der Entwicklungsfolge des *Altbaum-Hallenstadiums*, *Disintegrations-* und *Formierungsstadiums*, *Jungwuchs-* oder *Dickungsstadiums* bis *Jungbaum-* und *Stangenholzstadiums* sind besondere Arten der Lebensgemeinschaft Buchenwald spezialisiert: die Gruppen der höhlenbrütenden Vögel, der (tot)holzbewohnenden Vögel, der xylobionten Käfer und Pilze (MÜLLER ET AL. 2007).

Aus dem Vorhandensein dieser Sonderstrukturen und der daran gebundenen Lebensgemeinschaften die Forderung nach konstant hoher Strukturvielfalt und stetig wachsenden bzw. „ständig“ hohen Totholzmengen je Tiefland-Buchenwald**bestand** als Kriterien für einen guten Erhaltungszustand von FFH-Gebieten (ROSENKRANZ ET AL. 2012) bzw. für eine *gute fachliche Praxis* zu verbinden, ist mit der natürlichen Entwicklung dieser Waldbestände weder in Einklang zu bringen noch zu beweisen.

Sie zeugt eher vom Unverständnis der *Raum-Zeit-Dynamik* der natürlichen Waldentwicklung dieser Waldökosysteme. Die treffenden Anmerkungen SCHÜTZ (2001) seien an dieser Stelle deshalb wiedergegeben, der da ausführte: „*In diesem Zusammenhang sei der Hinweis erlaubt, daß in den Aussagen einiger Naturschützer, welche die Ungleichförmigkeit fördern und gleichzeitig den Wald sich selbst überlassen möchten, ein offenkundiger Widerspruch enthalten ist, zumindest lassen solche Aussagen vermuten, daß bislang nicht hinreichend erkannt worden ist, daß die Ungleichförmigkeit ein charakteristisches Merkmal des genutzten Waldes ist*“ (SCHÜTZ 2001, 25). Die Tendenz zur Gleichförmigkeit unbewirtschafteter Buchenwälder ist in einer aktuellen Untersuchung des größten noch vorhandenen Berg-Buchenurwaldes in den ukrainischen Karpaten erneut bestätigt worden (HOBI ET AL. 2015). Durch eine umfangreiche Literaturstudie in mitteleuropäischen Wäldern, die die Auswirkung der forstlichen Bewirtschaftung auf die Biodiversität auf Bestandesebene mittels paarweisen Vergleichs (unbewirtschaftet/bewirtschaftet) untersuchte, konnte dieser Trend zur Strukturhomogenisierung der unbewirtschafteten Waldbestände in den letzten Jahrzehnten ebenfalls beobachtet werden (DIELER ET AL. 2017, 763).

In den Kalkbuchenwäldern des Tieflandes gehen, wie die Untersuchungen zeigen, mit der Beendigung des *Jungbaum-* und *Stangenholzstadiums* diese an Tot- und Starkholz gebundenen Strukturen massiv zurück. Dieser strukturarme Zustand hält etwa 100 Jahre bis zum Ende des *Hallenwaldstadiums* an.

Sinnvoll wäre es deshalb, ein auf regionaler Ebene (mesochorische Ebene) bestehendes *Biotopverbundsystem* von Tieflandbuchenwaldbeständen unterschiedlicher Waldentwicklungsphasen als naturschutzfachliche „*Nachhalt- und Bewertungseinheit*“ einzurichten, in der ungenutzte Naturwälder und temporär ungenutzte Altholzinseln im Buchenwirtschaftswald (LU M-V 2002), die nach dem Zerfall wieder in die Bewirtschaftung genommen werden, integriert sind. So könnten *dynamisch* sowohl Lebensräume für die dem Naturschutz so am Herzen liegenden Gruppen der höhlenbrütenden Vögel, der (tot)holzbewohnenden Vögel, der xylobionten Käfer sowie Pilze als auch die an die anderen Waldentwicklungsphasen des Buchenwaldes gebundenen Arten regional erhalten werden.

Erste Untersuchungen auf Landschaftsebene bestätigen die hohe Biodiversität von Buchenwäldern, die eine räumliche und zeitliche Heterogenität des Waldaufbaus durch ein Nebeneinander unterschiedlicher Waldbauverfahren und Waldentwicklungsphasen aufweisen (AMMER ET AL. 2017; HOFMANN 2018).

Die langfristige Aufgabe der Ökosystemforschung, mittels verstärkter Untersuchung der Raum-Zeit-Dynamik **auf Bestandesebene** in den *Sand-, Lehm- und Kalkbuchennaturwäldern* der beiden forstlichen Klimastufen *feucht* und *mäßig trocken* des Nordostdeutschen Tieflands die „ökologisch-ökonomische Fahrinne“ dieser Buchenwaldökosysteme vergleichend zu erforschen, um einheitliche und objektivere naturschutzfachliche Schlussfolgerungen (ROSENKRANZ ET AL. 2012) zu ziehen, bleibt als wichtiges Ziel bestehen. Entsprechende Untersuchungsbestände sind in *Schattenblumen-, Flattergras- und Perlgras-Buchennaturwäldern* sowie *Hainrispengras-Hainbuchen-Buchennaturwäldern* Ende der 1960er Jahre in den Bundesländern Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern angelegt worden, die in den kommenden Jahren in das Disintegrations- und Formierungsstadium übergehen werden (MANSIK 1971, SCHAUER ET AL. 1971).

Den offenkundigen Widerspruch zwischen *Förderung der Ungleichförmigkeit des Buchenbestandes und dem Prozessschutz in Buchenwäldern* dem Naturschutz mit vergleichenden waldökologischen Biodiversitätsuntersuchungen zwischen bewirtschafteten und unbewirtschafteten Buchenwäldern auf bevorzugt *mesochorischer* Ebene offenzulegen und zu beweisen (BIBER ET AL. 2015; SCHALL ET AL. 2017) ist zu begrüßen und trägt zur Versachlichung der Naturschutzanforderungen an die Buchenwaldbewirtschaftung bei. Wünschenswert wäre aber auch hierfür eine möglichst exakte Identifikation der untersuchten Buchenwaldökosysteme und ihrer aktuellen Waldentwicklungsphase, um natürliche und künstliche (menschengemachte) Ursachen unterschiedlicher Biodiversität voneinander abzugrenzen. Denn: „*Aufgrund des Zusammenwirkens der Umweltfaktoren und des Wechselwirkens von Umwelt bzw. Standort und Vegetation weist zunächst jedes Waldökosystem eine einmalige Konfiguration der Merkmale auf, so daß Biodiversität [...] von Natur aus gegeben ist. Sie kann im Ausleseprozeß zwischen Boden, Klima und Vegetation, also im Ergebnis der Konkurrenz, natürlich entstanden sein, [...]. Sie kann aber auch künstlich entstanden sein durch direkte und indirekte Eingriffe des Menschen, die den Standort oder die Vegetation verändern. In diesen Fällen bewirken Interaktionen zwischen natürlichen und anthropogen induzierten Umweltfaktoren, natürlicher Pflanzenwelt und Kulturpflanzen ebenfalls Diversität mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Ebenen*“ (ANDERS & HOFMANN 1997, 96). Deshalb erlauben „*erst die genaue Kenntnis der Standortbedingungen und der Dynamik in der Entwicklung der Ökosystemtypen [...] im Vergleich mit natürlichen oder naturnahen Verhältnissen eine ökologische Bewertung von Biodiversität*“ (ANDERS & HOFMANN 1997, 108).

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen: Naturschutzfachliche Schlussfolgerungen und Bewertungen der Bewirtschaftung und des Erhaltungszustandes von Buchenwäldern des Nordostdeutschen Tieflands auf **Bestandesebene** sind in Abhängigkeit vom Waldökosystemtyp, die seine erkannten Merkmalsausprägungen bis hin zu genetischen Ausstattung als *ökologisch-ökonomische Fahrinne* einschließen, vorzunehmen. Ein ganzheitliche Sichtweise (Raum-Zeit-Ebene), die die Entstehungsgeschichte und die aktuelle Waldentwicklungsphase berücksichtigt, ist zwingend erforderlich. Als naturschutzfachliche

„*Nachhalt- und Bewertungseinheit*“, die die natürliche Dynamik der Tiefland-Buchenwälder berücksichtigt, bietet sich ein *Biotopverbundsystem* von Buchenwaldbeständen unterschiedlicher Waldentwicklungsphasen und Nutzungsintensität (bis hin zum kleinflächigen Nutzungsverzicht) auf regionaler Ebene als *integratives Konzept* an (OTTO 1997, 27). Die expansive, großflächige aus der Nutzungnahme vorhandener (Alt)-Buchenwälder als „hotspots“ der Biodiversität steht im Widerspruch zum beabsichtigten Ziel. Sie würde aufgrund der bestehenden Rechtsschiefheit der Altersklassenverteilung der Buchenwälder in der Region Berlin-Brandenburg (MIL BRANDENBURG; MLUV MECKLENBURG-VORPOMMERN 2010, 19) ohne aktive, zeitlich gestaffelte, waldbauliche Verjüngungsmaßnahmen für die Zukunft einen Mangel an Stark- und Totholz hervorrufen und ist im dichtbesiedelten Deutschland aufgrund der sozioökonomischen Auswirkungen auf die ländlichen Räume abzulehnen.

6. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den natürlichen Verjüngungszyklus von Tieflandbuchenwäldern am Beispiel des Brandenburger Naturwaldes *Fauler Ort*, der Ende der 1920er Jahre aus der forstlichen Bewirtschaftung entlassen wurde, über fünf Jahrzehnte zu rekonstruieren. Mit einem komplexen ökosystemaren Untersuchungsansatz wurde der Wandel der Vegetations- und insbesondere Bestockungsstrukturen vor dem Hintergrund kleinflächig differenzierter bodenchemischer Zustände, kleinklimatischer Bedingungen und Strahlungsverhältnisse analysiert. Die Beschreibung des aktuellen Waldzustandes wurde durch Untersuchungen zu den populationsgenetischen Strukturen der drei Hauptbaumarten und den Folgewirkungen der Totholzakkumulation ergänzt.

Das **Untersuchungsgebiet** befindet sich im natürlichen Buchenmischwaldgebiet Brandenburgs und repräsentiert die jungpleistozänen Kalkbuchenwälder Nordostdeutschlands. Ursprünglich sind die untersuchten Buchen-(Misch)Bestände aus Eichenwäldern hervorgegangen. Zum Zeitpunkt der Erstinventuren Ende der 1950er bzw. Ende der 1960er Jahre wurden die Waldflächen von der Buche beherrscht, die sich hinsichtlich ihrer Waldentwicklungsphase bereits überwiegend im *Altbaum-Hallenstadium* befanden. Im Jahre 2012 betrug das mittlere Bestandesalter 275 Jahre, die älteste Buche war ca. 400 Jahre alt.

Wesentliche Grundlage der Untersuchungen war die **Analyse einer echten Zeitreihe zur Waldentwicklung von drei Versuchsflächen** (ca. 50 x 50 m), die entsprechend ihrer Exposition als „*Kuppe*“, „*Hang*“ und „*Senke*“ bezeichnet wurden. Durch die erfolgreiche Identifizierung und nachfolgender Georeferenzierung dieser Versuchsflächen war es möglich, eine Wiederholungsinventur der Bestockung und Vegetation unter Nutzung von digitalen Raumdaten durchzuführen und mit einer ökosystemaren Detailstudie in Beziehung zu setzen.

Alle drei Versuchsparzellen liegen auf engstem Raum nebeneinander, unterschieden sich jedoch hinsichtlich standortkundlicher Parameter. Die in einem systematischen Raster von 10 m x 10 m erhobenen Bodenproben des Mineralbodens der Tiefenstufe 0-5 cm entsprechen in der Gesamtschau den typischen Eigenschaften einer Bodenbildung aus Geschiebemergel im nordostdeutschen Tiefland mit dem Humuszustand Mull.

Bei den Untersuchungsflächen *Kuppe* und *Hang* handelt es sich um anhydromorphe Standorte kräftiger bis reicher Stammtriebe mit überwiegend Kalk in pflanzenverfügbarer Tiefenstufe. Die festgestellten Kalktiefen und Bodenarten schwankten auf den nicht grundwasserbeeinflussten Standorten kleinräumig sehr stark. Typisch für die nicht grundwasserbeeinflusste *Kuppe* und *Hang* sind *Tiefflehm-Fahlerden* mit Kalktiefen zwischen 0,55 m und 1,20 m. In der grundfeuchten *Senke* haben sich Staugley-Fahlerden gebildet. Die Kalktiefen schwankten bei einem beobachteten Nord-Südgefälle zwischen 0,8 m und > 2 m. Bei wassergesättigten Böden wird Kalk oberflächennah hangabwärts in die *Senke* und den Unter-*Hang* transportiert.

Die **mikroklimatischen Unterschiede** zwischen den drei Flächen *Kuppe*, *Hang* und *Senke* sind anhand eines vegetationsanalytischen Methodenvergleichs (ELLENBERG 2000; HOFMANN & POMMER 2013; OBERDORFER 1990), mit indirekten methodischen Verfahren herausgearbeitet worden. Übereinstimmend im Methodenvergleich (HOFMANN & POMMER 2013; OBERDORFER 1990) ist eine *Abnahme* der Temperatur und eine *Zunahme* der Kühle und Bodenfrische von der *Kuppe* über den oberen Teil der Fläche *Hang* bis zum unteren Bereich des *Hanges* auf den nicht grundwasserbeeinflussten Vegetationsparzellen

festzustellen. Die mikroklimatische Charakteristik der unter zeitweilig erhöhtem Grundwassereinfluss stehenden *Senke* ist ein Sonderfall durch die Kombination von Wärme mit zeitweilig erhöhter Grundfeuchte.

Anhand von **georeferenzierten historischen Luftbildern und daraus abgeleiteten Vegetationshöhenmodellen** konnte der Zusammenbruch des Buchenaltbestandes und die Formierung der nachfolgenden Waldgeneration nachvollzogen werden: Zwischen 1960 und 1970 entstanden erste große Bestandeslücken auf dem *Hang*. Begünstigt durch Windwurfschäden zweier Orkane in den 1970er Jahren griff der Zusammenbruch auf die *Senke* und *Kuppe* über. Dies war die Initialzündung für eine neue Waldentwicklung. Es entstand ein kleinflächiger, überwiegend trupp- bis gruppenweisen Wechsel von Buchen, Winter- und Sommerlinden und Exemplaren des Berg-Ahorns. Einzelne Hainbuchen, Exemplare des Spitz-Ahorns, der Gemeinen Esche, Berg-Ulme und Rot-Erle wanderten ein. Der Berg-Ahorn hatte eine Pionierfunktion inne. Er bildete, das vorhandene Lückenangebot nutzend, erste Verjüngungszellen. Die anderen Baumarten verjüngten sich zeitlich versetzt unter und neben den Ahornverjüngungszellen. Nur wenige Überhälter der alten Waldgeneration sind heute noch vorhanden. Die im Jahre 1991 erkennbaren kleinflächigen Verjüngungskerne waren bis zum Jahre 2012 zu großflächigeren Einheiten zusammengewachsen.

Der **Bestandeswandel** ist auf den drei Flächen unterschiedlich schnell verlaufen und führte zu differenzierten Ökosystemtypen. Am weitesten ist die Entwicklung in der *Senke* und dem Unter-*Hang* vorangeschritten. Der Restvorrat an Überhältern der alten Baumgeneration verringerte sich kontinuierlich weiter. Aufgrund der in den letzten 21 Jahren gezeigten Wachstumsgeschwindigkeit der Verjüngungskerne ist prognostisch spätestens in etwa zwanzig Jahren zu erwarten, dass sich eine Angleichung der Bestandeshöhen hin zu einem *Frühen Hallenwaldstadium* auf ganzer Fläche der drei Bestände vollziehen wird.

Auf den höchsten Erhebungen, repräsentiert durch die Versuchsfläche *Kuppe* und dem Ober-*Hang*, entwickelte sich der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald*, in der in reliefbedingt trockener Lage unter einem Schirm von Winter- und Sommer-Linde, Buche, Hainbuche, Berg- und Spitz-Ahorn und Gemeiner Esche (sowie Berg-Ulme und Schwarzer Holunder) eine artenreiche Bodenvegetation entstand. Bei zunehmender Luftfeuchte und Luftkühle geht unterhalb des Nordwest exponierten Mittel-*Hangs* dieses Waldökosystem in den kalkliebenden *Bingelkraut-Buchenwald* über, in der die Buche und der Berg-Ahorn die alleinige bestandesbildende Kraft besitzen. Im Osten des Naturwaldes hat sich in einer grundfeuchten *Senke* das Waldökosystem des kalkliebenden *Eschen-Buchenwaldes* herausgebildet. Dieser kann als ein gutwüchsiger Mischbestand aus Buche, Berg- und Spitz-Ahorn, Winter- und Sommer-Linde, Gemeiner Esche, Rot-Erle sowie Berg-Ulme charakterisiert werden.

Das bestandesweise **Höhenwachstum** der Buche auf der *Kuppe* und dem Ober-*Hang* verläuft im Vergleich zur *Senke* und Unter-*Hang* deutlich gebremst. Infolgedessen können hier Mischbaumarten (Winter- und Sommer-Linde) im Höhenwachstum mit der Buche mithalten oder dieses (wie Hainbuche und Berg-Ahorn) sogar übertreffen. Auf dem Unter-*Hang* überwächst die Buche die Mischbaumarten Berg-Ahorn und Berg-Ulme. In der grundfeuchten *Senke* meidet die Buche die tieferen Standorte. Sie besiedelte vor allem die höher gelegenen Bestandespartien und hat hier einen Wuchsvorsprung gegenüber den anderen Mischbaumarten.

Eine vergleichende **Zeitreihenanalyse der Stammzahldichten** der Erst- und Wiederholungsinventur der Baumarten Buche, Berg-Ahorn, Sommer- und Winter-Linde belegt die Bestandesdynamik der letzten Jahrzehnte. Die Stammzahldichten der Erstinventuren zeigten noch mit der (fast) gleichmäßigen Verteilung der Buche über alle drei Flächen den ursprünglichen forstlichen Einfluss. In der aktuellen Wiederholungsinventur verdeutlichen die erzeugten Punktdichtekarten der Baumarten Buche, Berg-Ahorn, Sommer- und Winter-Linde die baumartspezifischen standörtlichen (insbesondere mikroklimatischen) Nischen der jeweiligen Baumart, in der sie sich erfolgreich behaupten konnte. Unter Verwendung binär logistischer Regressionsgleichungen konnten diese baumartenspezifischen standörtlichen Nischen durch die unterschiedliche (positive oder negative) Wirkung der Standortsfaktoren *Geländehöhe*, *Hangneigung*, *Exposition* und *Kalktiefe* auf das erfolgreiche Aufwachsen der Baumarten Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie Berg-Ahorn als mathematisches Modell herausgearbeitet werden.

Neben der Erfassung der Gehölzstruktur auf Artebene wurden zusätzlich die **populationsgenetischen Strukturen** der drei Versuchsparzellen für die Gattungen *Fagus* und *Tilia* anhand von DNA-Mikrosatelliten untersucht. Die populationsgenetischen Parameter bestätigen die vergleichsweise hohe genetische Diversität der planaren Buchen- und Buchenmischwäldern Ostdeutschlands. Sowohl der genetische Abstand nach NEI (1972) zwischen den drei Buchenflächen als auch zwischen den Buchen der verschiedenen Durchmesserklassen war sehr gering. Die Anzahl heterozygoter Allele an den zehn Mikrosatellitengenorten schwankte zwischen 3 und 10. Die Heterozygotiegrade zeigten Klumpungen in einer Ausdehnung von 20 m bis 30 m. Die Anzahl seltener Allele [5 %] war trotz unterschiedlicher Probenzahlen zwischen den Populationen annähernd gleich verteilt. Der höchste Anteil seltener Allele [1 %] wurde in der noch wenig differenzierten Jungwuchs- und Stangenholzphase gefunden. Im Vergleich zum *Bingelkraut-Buchenwald* des Mittel- bis Unter-Hangs war in den beiden Buchenmischwald-Ökosystemen ein vergleichsweise höherer durchschnittlicher Anteil von seltenen und privaten Allelen festzustellen, der im *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* der Kuppe am höchsten war.

Darüber hinaus wurden 50 Individuen der Winter-Linde und 35 der Sommer-Linde an elf Mikrosatellitengenorten analysiert. Von den 116 Individuen dieser Gattung der drei Flächen wiesen 26 identische Genorte aus vegetativer Vermehrung auf. Für die Artunterscheidung wurde der Genort Tc 918 verwendet. Die drei Lindenpopulationen unterschieden sich im Anteil an Sommer- und Winter-Linden. Die Sommer-Linde hat im Vergleich zur Winter-Linde eine deutlich höhere Anzahl an Allelen sowie mehr private Allele über alle Genorte. Der genetische Abstand nach NEI (1972) zwischen den Linden der drei Flächen ist im Unterschied zu den drei Buchenpopulationen deutlich differenziert. Zwischen den Linden der beiden Teilareale des *Winterlinden-Buchenwaldes* der Kuppe und des Ober-Hangs bestand ein auffallend großer genetischer Abstand ebenso zwischen den einzelnen Durchmesserklassen der Lindenpopulation. Die höhere genetische Diversität der mittleren Durchmesserklasse (201 mm–400 mm) unterschied sich auffällig von den schwächeren und stärkeren Durchmesserklassen.

Mit dem Wandel der Bestockungsstruktur änderten sich ebenfalls die **Strahlungsverhältnisse**, die mittels fotografischer fisheye-Aufnahmen und anschließend modellierter Strahlungsschätzung im strahlungsreichen Frühjahr und im Sommer untersucht wurden. Im *Strahlungsfrühjahr* waren nur geringe, nicht signifikante Unterschiede in den Medianwerten des DIFFSF, DIRSF und TOTSF zwischen den drei Buchen-Ökosystemen festzustellen. Die Medianwerte der drei Strahlungsgrößen bewegten sich zwischen 51 % und

54 % der Freiflächenwerte, die *Gap Fraction* variierte zwischen 31 % und 33 %. Die Medianwerte des DIFFSF, DIRSF und TOTSF des *Bingelkraut-Buchenwaldes* waren im Vergleich niedriger und deren Streuung geringer als die der beiden Buchenmischwald-Ökosysteme. Die DIFFSF, DIRSF und TOTSF der einzelnen Höhenklassen sowie die Wuchsklassen unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Im *Sommerhalbjahr* gingen die Medianwerte der Strahlungsgrößen auf Werte zwischen 7 % und 13 % der Freiflächenwerte und die *Gap Fraction* auf 6 % bis 7 % zurück. Die Mittelwerte des DIFFSF, DIRSF und TOTSF unterschieden sich signifikant zwischen den drei Buchen-Ökosystemen. Der DIRSF und TOTSF differenzierte sich signifikant zwischen dem *Bingelkraut-Buchenwald* und den beiden Buchenmischwald-Ökosystemen. Beim DIFFSF war ein signifikanter Unterschied zwischen dem *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* und dem *Eschen-Buchenwald* festzustellen. Die Medianwerte des DIRSF (7 %³⁰) und TOTSF (8 %³⁰) des *Bingelkraut-Buchenwaldes* waren signifikant niedriger als die der beiden Buchenmischwald-Ökosysteme. Sie belegten die im Flächenvergleich geringere Energieeinstrahlung am *Hang*. Der DIFFSF-Wert des *Bingelkraut-Buchenwaldes* war nur unwesentlich geringer. Signifikante Unterschiede bestanden zwischen den DIRSF- und TOTSF-Werten der einzelnen Höhenklassen, mit zunehmender Höhenklasse stiegen im Wertebereich von 10 m bis 22,5 m beide Werte.

Der **Vegetationszustand** wurde wiederholt flächenübergreifend kartiert. Zur Bewertung der Oberbodenzustände wurde dieser in drei soziologische Artengruppenkombinationen zusammengefasst: die *Mercurialis-Lamium*, der *Aegopodium-Lamium* und der *Melica uniflora-Lamium* Artengruppenkombination. Die Standorte der drei soziologischen Artengruppenkombinationen unterschieden sich signifikant in den Kalktiefen sowie den $DK_{C/N}$ und $DK_{V\%}$ Werten, aber nicht in den DK_F Werten. In der Gesamtbewertung aller untersuchten Standortsfaktoren erweist sich die WEISE'SCHE Oberhöhe [H_o] als das Maß für die Konkurrenzkraft der Buche in den drei Beständen entscheidenden vegetationswirksamen Standortsfaktors der *Luftfeuchte* und *Kühle*.

Die punktgenaue Kartierung und Rekonstruktion abgestorbener Buchen ermöglichte eine **Analyse der Zersetzungsdynamik** innerhalb der letzten fünf Jahrzehnte. Mit dem Ende des in den 1960er Jahren in den Flächen *Hang* und *Senke* begonnene und in den 1980er Jahren auch auf die Fläche *Kuppe* übergegriffene *Disintegrations- und Formierungsstadium* nahm zeitlich befristet der Totholzanteil zunächst deutlich zu. Im Zuge der sich anschließenden Zersetzungsprozesse wurden insgesamt 141 t C/ha und 446 kg N/ha auf der *Kuppe*, 59 t C/ha und 204 kg N/ha auf dem *Hang* sowie 220 t C/ha und 669 kg N/ha in der *Senke* mikrobiell freigesetzt. Dies führte langfristig zu keiner schlechteren Humusform. Eine vergleichende Beprobung der *Auflage* von zehn Totholzresten der Buche mit dem Mineralboden der Tiefenstufe (0-5 cm) *unter*, *direkt neben*, in *1 m Entfernung* vom Totholz sowie der Vergleich mit der 10 m x 10 m Rasterbeprobung derselben Tiefenstufe ergab, dass das freigesetzte Überangebot an Kohlenstoff aus dem Totholz innerhalb weniger Jahrzehnte fast vollständig zu CO₂ umgesetzt und an die Atmosphäre abgegeben wurde. In der Tiefenstufe (0-5 cm) *unter* und *neben dem Totholz* befanden sich am Ende des Mineralisierungsprozesses nur geringfügig höhere C-Anteile.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, die anhand von acht Ausgangshypothesen zum Ökosystemwandel diskutiert wurden, dass es im Nordostdeutschen Tiefland in der

³⁰ des Freiflächenwertes

Buchenwald- und Buchenmischwald-Klimaregion aufgrund insbesondere differenzierter Klima-, Feuchte- und Trophieausstattung zur Ausbildung unterschiedlicher Buchenwaldökosystemtypen kommt. Mit einer jeweils einheitlichen Baumartenzusammensetzung und homogenen ökologisch-ökonomischen Merkmalskonfigurationen (einschließlich populationsgenetischer) sowie phasenabhängiger Waldstrukturen (inklusive Sonderstrukturen und Totholzangebot) unterscheiden sich diese untereinander. Ein Waldmonitoring hat dem durch einen ganzheitlichen und ökosystembezogenen Untersuchungsansatz Rechnung zu tragen, um objektive Schlußfolgerungen für Bewirtschaftung und Naturschutz ziehen zu können. Eine georeferenzierte Feldarbeit unter Nutzung raumbezogener Geodaten ist hierfür das Mittel der Wahl.

7. Abstract

The main method of the present study was a real time series study of three locally different beech areas, which naturally rejuvenated during the investigation period, when they were released from forest management at the end of the 1920s. As a special feature of Brandenburg, the study areas represent the young Pleistocene limestone beech forests of northeastern Germany and are located in the natural mixed beech forest area of Brandenburg. Originally they originated from oak forests.

At the time of the first inventories at the end of the 1950s and the end of the 1960s, the forest areas were dominated by beech. The three test areas are located in a very confined space next to each other and are located on a hilltop, a northwest slope in front of it and an eastern adjacent, moist depression. The analysis of the site characteristics of the three survey areas by determining the depth of limestone, the chemical state of the upper soil (depth 0-5 cm) by means of soil analyses and the indirect analysis of vegetation (vegetation-analytical methodological comparison according to ELLENBERG 2000; HOFMANN & POMMER 2013; OBERDORFER 1990) revealed the small-scale differences between the areas. In order to evaluate the topsoil conditions, a vegetation study and their analysis of the formation of sociological species group combinations were carried out. In the overall assessment of all location factors examined, the Weise Height [H_o] of the three beech stands proves to be the measure for developing the essential vegetative location factor of humidity and coolness. The relief-related drought and warmth on the hilltop and on the upper slope caused growth in beech stands to slow down significantly compared to the lower and lower slopes. Mixed tree species can keep up with or even surpass beech in height growth, while on the lower slope the beech grows above the mixed tree species involved. In the base-humid depression, beech avoids the deeper locations and colonised above all the higher areas of the stand. Here it has a growth advantage over the other tree species.

The differentiated location of the three study areas led to the formation of three forest ecosystems, the *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* on the dry and warm hilltop, the *Bingelkraut-Buchenwald* on the cooler and more humid north-western slope and the *Eschen-Buchenwald* in the moist valley.

With the change of the stocking structure, the radiation conditions changed, which were investigated by means of photographic fisheye photographs and subsequently modelled radiation estimation in the radiant spring and summer.

The precise mapping and reconstruction of dead beech trees made it possible to analyse the decomposition dynamics of beech deadwood over the last five decades. Both work complexes, the recording of the initial inventory and the repeated inventory of vegetation and stocking as well as the clarification of their local causes, were georeferenced and the results were stored in digital form in a geographical information system (GIS) for the detection of causal relationships. By means of geostatistical methods, a spatial change analysis of the stocking was carried out by comparing the subsequent stocking with the initial stocking in the sense of a space-time analysis. Methods of geomatics (measurement, photogrammetry, geostatistics, geoinformation systems) allow to reconstruct and analyse the change into the new forest generation and to forecast further forest development in order to draw conclusions for a site-specific management of lowland beech forests.

An inventory of the genetic diversity of the tree species beech, winter and summer lime as a starting point for genetic monitoring was carried out.

8. Literaturverzeichnis

ABSCHÄTZUNGSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW-LÖCKNITZ (1849) im Abschätzungswerk von der Oberförsterei Gramzow inclus Loecknitz de 1851 (Erstes Wirtschaftsjahr 1849) Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam Rep. 2 A III F Nr. 7415

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE UND DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (1995): Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart und Hannover

AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL <http://www.agisoft.com> (Stand: 20.9.2017)

AHRENS, W. (2001): Analyse der Waldentwicklung in Naturwaldreservaten auf Basis digitaler Orthobilder. Inaugural-Dissertation. Universität Freiburg

AKCA, A.; PAHL, A.; SETJJE-ILERS, U; WOLFF, B. (1992): Waldkundliche Zustandserfassung der Naturwaldzelle Hellberg mit Hilfe von permanenten Stichproben. Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen

AMMER, C. (1996): Konkurrenz um Licht- zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald Schriftenreihe der Forstw. Fakultät der Univ. München 158/1996

AMMER, C.; SCHALL, P.; GOßNER, M.M.; FISCHER, M. (2017): Waldbewirtschaftung und Biodiversität: Vielfalt ist gefragt! AFZ – Der Wald 17/2017: 20–25

ANDERS, S. (1974): Untersuchungen zur Klärung ökologischer Möglichkeiten und Grenzen der Fichtennaturverjüngung in den sächsisch-thüringischen Mittelgebirgen mit Hilfe von Pfadkoeffizienten. Dis.. A, 1974, TU Dresden, Sektion Forstwissenschaft Tharandt

ANDERS, S.; HOFMANN, G. (1997): Vielfalt in der Vegetation von Wäldern und Forsten. In: Biologische Vielfalt in Ökosystemen-Konflikt zwischen Nutzung und Erhaltung. Schriftenreihe des BELF Angewandte Wissenschaft Heft 465: 94–108

ANDERSON, M. C. (1964): Studies of the woodland light climate. J. Ecol. 52: 27–41

ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (2003): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Kennzeichnungen, Erläuterungen, 6. Auflage. IHW-Verlag Eching bei München

ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortsaufnahme. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. IHW-Verlag Eching bei München. 7. Auflage

Arc GIS 10.1: <https://www.esri.de/support-de/produkte/arcgis-for-desktop-10-1> (Stand: 20.9.2017)

ASCHERSON, P. (1864): Flora der Provinz Brandenburg, der Altmark und des Herzogthums Magdeburg. Berlin 1864

BARDELLI, T.; GOMEZ-BRANDON, M.; ASCHER-JENULL, J.; FORNASIER, F.; ARFAILO, P.; FRANCIOLI, D.; EGLI, M.; SARTORI, G.; INSAM, H.; PIETRAMELLARA, G. (2017): Effects of slope exposure on soil 188cosys-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps. Science of the Total Environment 575, 1041–1055

BARENGO, N. (2001): Projekt Förderung seltener Baumarten. Professur Waldbau, ETHZ, Eidg. Forstdirektion Buwal

BARRIERE, G.; COMPS, B.; CUGUEN, J.; NISIBA, F. & THIEBAUT, B. (1985): The genetical ecological variability of beech (*Fagus sylvatica* L.) in Europe. An alloenzymatic study: Genetic isolations of beechwoods. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg 150: 24–50

- BEGEHOLD, H. (2017): Impact of naturalness-promoting beech forest management on the forest structure and diversity of breeding birds. Dissertation Dresden
- BESCHREIBUNG UND BETRIEBSBESTIMMUNG VOM FORSTREVIER GRAMZOW (1822–1841): Titel des Bandes: Beschreibung und Betriebs-Bestimmung vom Forstrevier Gramzow. Inspektion Neustadt E/W, Regierungs- Bezirk Potsdam. Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam Rep. 2 A III F Nr. 7410
- BESCHREIBUNG, ERTRAGSERMITTLUNG UND BETRIEBSPLAN FÜR DAS FORSTREVIER GRAMZOW (1831–1850): Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam Rep. 2 A III F Nr. 7411
- BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW vom 1.X.1922–1933. Betriebsplan aus Rep. 2A Regierung Potsdam III Forsten Nr. 7427
- BEUSHAUSEN, L. (1899): Erläuterungen der geologischen Specialkarte Preussen und den Thüringischen Staaten. Lieferung 76, Blatt Polssen, Verlag Paul Parey, Berlin
- BIBER, P.; BORGES, J. G.; MOSHAMMER, R.; BARREIRO, S.; BOTEQUIM, B.; BRODRECHTOVA, Y.; BRUKAS, V.; CHIRICI, G.; CORDERO-DEBETS, R.; CORRIGAN, E.; ERIKSON, L. O.; FAVERO, M.; GALEV, E.; GARCIA-GONZALO, J.; HENGVELD, G.; KAVALLIAUSKAS, M.; MARCHETTI, M.; MARQUES, S.; MOZGERIS, G.; NAVRATIL, R.; NIEUWENHUIS, M.; ORAZIO, C.; PALIGOROV, I.; PETTENELLA, D.; SEDMAK, R.; SMRECEK, R.; STANISLOVAITIS, A.; TOME, M.; TRUBIS, R.; TUCEK, J.; VIZZARRI, M.; WALLIN, I.; PRETZSCH, H.; SALLNÄS, O.; (2015): How sensitive are ecosystem service in European forest landscapes to silvicultural treatment? *Forests* 2015 (6): 1666–1695
- BIEDERBICK, K.-H. (1991): Untersuchungen zur reliefbedingten Variation von Vegetation und Standort. Dissertation Göttingen
- BILELA, S.; DOUNAVI, A.; FUSSI, B.; KONNERT, M.; HOLSST, J.; MAYER, H.; RENNENBERG, H.; SIMON, J. (2012): Natural regeneration of *Fagus sylvatica* L. adapts with maturation to warmer and drier microclimatic conditions. *Forest Ecology and Management* 275: 60–67
- BILKE, G. (2004): Waldumbau in Nordostdeutschland durch Eichennachzucht in Mortzfeldtschen Löchern. Dissertation. Freiburg i. Br.: 208 S.
- BOHN, U.; WEBER, H. (2000): Karte der natürlichen Vegetation Europas. Maßstab 1 : 2,5 Mio. Bundesamt für Naturschutz. Teil 1: Erläuterungstext, Teil 2: Legende, Teil 3: Karten, Bonn
- BOLTE, A. (1999): Abschätzung von Trockensubstanz-, Kohlenstoff- und Nährelementvorräten der Waldbodenflora – Verfahren, Anwendung und Schätztafeln. *Forstwiss. Beiträge Tharandt* (7) 129 S.
- BOLTE, A. (2005): Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa. *AFZ/Der Wald*. 20, 1077–1078
- BRA (2000): Betriebsregelungsanweisung Landeswald im Land Brandenburg, Landesforstanstalt Eberswalde, S. 24
- BRAUN-BLANQUET (1964): Pflanzensoziologie – Grundzüge der Vegetationskunde. Dritte Auflage. Springer-Verlag Berlin
- BRÜNN, S. (1992): Kleinräumige Vegetations- und Standortsdifferenzierungen in einem Kalkbuchenwald. Dipl.-Arbeit Syst.-Geobot. Inst. Uni. Göttingen
- BRUNNER, A. (1993): Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen und eine Methodenstudie zur ökologischen Lichtmessung. *Forstw. Fak. Univ. München und Bayerische forstl. Versuchs. Anst. München*, 262 S.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2003): Tagungsbericht der Expertenklausur „Naturerbe Buchenwald“. Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (1964): Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. *Forstarchiv* 35, 225–233

- BURSCHEL, P.; SCHMALZ, J (1965): Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 136. Jg., 9, 193–210
- CAJANDER, A. K. (1922): Zur Begriffsbestimmung im Gebiet der Pflanzentopographie. J. Simelius`en Perillisten Kirjapaino O. Y.
- CAJANDER, A. K.(1930): Wesen und Bedeutung der Waldtypen. 2. Auflage Akad. Buchh. Helsingfors. 66 S.
- CZAJKOWSKI, TOMASZ (2006): Zur zukünftigen Rolle der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der natürlichen Vegetation- waldökologische Untersuchungen zur Buchen-Naturverjüngung an der östlichen Buchenwald-Verbreitungsgrenze. Dissertation Göttingen
- CZARKOWSKI, TOMASZ (2016): Mündliche Mitteilung
- CHRISTENSEN, M.; HAHN, K.; MOUNTFORD, E. P.; ODOR, P.; STANDOVAR, T.; ROZENBERGAR, D.; DIACI, J.; WIJDEVEN, S.; MEYER, P.; WINTER, S.; VRŠKA, T.(2005): Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. Forest Ecology and Management 210: 267–282
- DEGENHARDT, A. (2001): Algorithmen und Programme zur waldwachstumskundlichen Auswertung von Versuchs- und Probeflächen. Bericht 5/2001 (unv.)
- DENGLER, A. (1935): Waldbau auf ökologischer Grundlage. Zweite Auflage. Verlag Julius Springer Berlin
- DIELER, J.; UHL, E.; BIBER, P.; MÜLLER, J.; RÖTZER, T.; PRETZSCH, H. (2017): Effect of forest stand management on species composition, structural diversity, and productivity in the temperate zone of Europe Eur J Forest Res 136: 739–766
- DOHRENBUSCH, A. (1987): Kann die „relative Beleuchtungsstärke“ die Lichtverhältnisse im Walde zuverlässig charakterisieren? Forstarchiv 58: 24–27. Hannover
- DRÖBLER, LARS (2006): Struktur und Dynamik von zwei Buchenurwäldern in der Slowakei. Dissertation. Göttingen
- Dumolin,S.; Demesure, B.; Petit, R.J.(1995): Inheritance of chloroplast and mitochondrial genomes in pedunculate oak investigated with an efficient PCR method. TheorAppl Genet 91: 1253–1256
- DOUNAVI, A. (2000): Familienstrukturen in Buchenbeständen (*Fagus sylvatica*) Dissertation Göttingen
- EBER, W.(1972): Über das Lichtklima von Wäldern bei Göttingen und sein Einfluß auf die Bodenvegetation. Skripta Geobotanica 3: 1–150
- ELLENBERG, H.(2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Goltze Verlag Göttingen
- EICHHORN, J. (1995): Stickstoffsättigung und ihre Auswirkungen auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg. Habilitationsschrift. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 124, 175 S.
- EISMANN, TILL: (1994): Analyse der Struktur und Entwicklung der Buchennaturverjüngung im Naturschutzgebiet Heilige Hallen. Diplomarbeit. Göttingen
- EL KATEB, H. (1991): Der Einfluß waldbaulicher Maßnahmen auf die Sproßgewichte von Naturverjüngungspflanzen im Bergmischwald. Forstl. Forschungsb. München 111, 193 S
- ERDAS IMAGINE 2014 PROFESSIONAL: <http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/erdas-imagene> (Stand: 20.9.2017)
- ERHARDT, O (1988): Der Strahlungshaushalt eines Buchenwaldes und dessen Abwandlung während der verschiedenen phänologischen Entwicklungsphasen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 45
- FIELD-MAP: www.fieldmap.cz (Stand: 20.9.2017)

- FRECH, A. (2006): Walddynamik in den Mischwäldern des Nationalpark Hainich, Untersuchung der Mechanismen und Prognose der Waldentwicklung. Dissertation Universität Göttingen. 120 S.
- FROMM, M. (2001): Reproduktion einer entomophilen Baumart in geringer Populationsdichte. Das Beispiel der Winterlinde (*Tilia cordata* Mill) Dissertation Universität Göttingen 236 S.
- FUCHS, H.-J. (2003): Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbildauswertung. Dissertation. Univ. Göttingen, 138S.
- FUSSI, B. (2014): Ergebnisbericht der genetischen Analysen der Buchen und Lindenproben vom Faulen Ort (unv.)
- FUSSI, B; CREMER, E.; KONNERT, M. (2014): Auf der Suche nach anpassungsrelevanten Genen bei Waldbäumen. In: LWF Wissen 74 Forstgenetik, Forstgenressourcen und Forstvermehrungsgut. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft: 27–31
- FUSSI, B. & CREMER, E. (2017): Genetische Analysedaten zweier Saatgutpartien und einer Samenplantage des Zertifizierungsrings für überprüfbare Forstliche Herkunft Süddeutschland e. V., unv.
- GAUER, J; ALDINGER, E. (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke – mit Karte 1 : 1.000.000, Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung Nr. 43, August 2005
- GOHL (1972): Geomorphologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland. M 1:1.000.000, Forschungen zur deutschen Landeskunde Bd. 184
- GRALLA, T.; UNDEN, T. (1995): Über den Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Buchenvoranbauten in Fichtenalthölzern des Harzes und den herrschenden Beleuchtungsverhältnissen bzw. Schlußgraden. Diplomarbeit am Fachbereich Forstwirtschaft FH Hildesheim/ Holzminden
- GREGORIUS, H.-R.; HARLIZIUS, B.; ENGELS, J (2004): Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen des Beirats für Biodiversität und genetische Ressourcen beim BMVEL. In: Analyse und Bewertung der genetischen Vielfalt in der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft zur Ableitung von Entscheidungskriterien für Erhaltungsmaßnahmen. Tagungsband Symposium 27. In Mariensee, Neustadt a. Rbge. ZADI, Band 24. XI–XVII
- GRIMM, V.; RADEMACHER, C. (2004): Der Buchenurwald im Zeitraffer: Ergebnisse des Simulationsmodells BEFORE: In: Forschungsberichte. Hessen-Forst. Band 31. Ergebnisse und Perspektiven angewandter Buchenforschung in Hessen. Hessisches Naturwaldforum Buche am 19. Januar 2004: 47–56
- GÖNNERT, THOMAS (1989): Ökologische Bedingungen verschiedener Laubwaldgesellschaften des Nordwestdeutschen Tieflandes. Dissertation Botanicae Band 136
- HARMON, M. E.; FRANKLIN, J. F.; SWANSON, F. J.; SOLLINS, P.; GREGORY, S. V.; LATTIN, J. D.; ANDERSON, N. H.; CLINE, S. P.; AUMEN, N. G.; SEDELL, J. R.; LIENKAEMPER, G. W.; CROMACK, K. J.; CUMMINS, K. W. (1986): Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15: 133–302
- HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. (1997): Wachstum junger Eichen unter Schirm. Berichte des Forschungszentrum Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 147. Göttingen, 142 S.
- HBU = Handbuch der Bodenuntersuchung, Wiley-VCH, 2005
- HEINKEN, T. (1995): Naturnahe Laub- und Nadelwälder grundwasserferner Standorte im niedersächsischen Tiefland; Gliederung, Standortsbedingungen, Dynamik. Dissertation Botanicae Göttingen
- HFA = Handbuch Forstliche Analytik, Grundwerk 2005 und spätere Ergänzungen,

herausgegeben vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik, veröffentlicht auf der Internetseite des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (www.bmelv.de, Untermenü Wald, Untermenü Bodenzustandserhebung)

HOBİ, M. L.; COMMARMOT, B.; BUGMANN, H. (2015): Pattern and process in the largest primeval beech forest of Europe (Ukrainan Carpathians). *J Veg Sci* 26(2): 323–336

HOFMANN, G. (1962): Synökologische Untersuchungen im Waldschutzgebiet Gellmersdorfer Forst/ Oder. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 2. Band, Heft 2: 105–139

HOFMANN, G. (1964): Kiefernforstgesellschaften und natürliche Kiefernwälder im östlichen Brandenburg. *Archiv für Forstwesen* 13: 641–664; 717–732

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2004): Das natürliche Waldbild Brandenburgs. *AFZ/Der Wald* 22/2004: 1211–1215

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2005): Potentielle Natürliche Vegetation von Brandenburg und Berlin mit Karte im Maßstab 1:200.000. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 24. Eberswalde/Potsdam

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2013): Die Waldvegetation Nordostdeutschlands. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 54. Eberswalde/ Potsdam

HOFMANN, G. (2014): Ökobionik in forstlicher Anwendung. *Waldumbau in der Stiftung Schorfheide-Chorin AFZ – Der Wald* 15/2014: 41–45

HOFMANN, G. (2018): Pflanzenarten- und Strukturvielfalt in Wirtschaftswäldern. *AFZ – Der Wald* 1: 31–38 (im Druck)

HUECK, K. (1941): Der „Faule Ort“ in der Staatsforst Gramzow. *Brandenb. Jahrbücher* 14

HOLST, T.; MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; ROST, J., SCHINDLER, D. (2001): Mikroklima in Buchenbeständen auf gegenüberliegenden Hängen in der Schwäbischen Alp. In: *Beitr zur 1. Deutsch – Österreichisch – Schweizerischen Meteorologentagung Wien. Sept. 2001, Österrech. Beitr Meteor Geophys Heft 27, Session 7a*: 1–18

HOLZKAMM, D. (1959): Waldwachstumskundliche Untersuchungen an naturnahen Waldaufbauformen des Melico-Fagetum im Waldschutzgebiet „Fauler Ort“ bei Gramzow/ Uckermark. Diplomarbeit HUB/ Eberswalde

GADOW, V. K. (1999): Waldstruktur und Diversität. *Allg. Forst-u. J.-Ztg.*, 170. Jg., 7: 117–122

ISLEIB, D. (2006): Genetische Strukturen in Buchen-Altbeständen und Naturverjüngung (*Fagus sylvatica* L.) des Mittleren Erzgebirges. *Forstwiss. Beiträge Tharandt* (27): 136 S.

JENSSEN, M.; HOFMANN, G. (1996): Der natürliche Entwicklungszyklus des baltischen Perlgras-Buchenwaldes (Melico-Fagetum). *Anregungen für naturnahes Wirtschaften. Beitr. Forstwirtsch. U. Landsch. Ökol.* 30. 114–124

JENSSEN, M.; HOFMANN, G.; RÜTZ, A.; STÖCKER, G. (2003) Ergebnisse waldkundlicher Selbstorganisationsforschung im NSG Serrahn mit Bedeutung für eine naturnahe Waldbewirtschaftung. *Natur und Naturschutz in Mecklenburg-Vorpommern* 38: 43–51, Greifswald

JENSSEN, M.; HOFMANN, G. (2005) Einfluss atmogener Stickstoffeinträge auf die Vielfalt der Vegetation in Wäldern Nordostdeutschlands. *Beitr. Forstwirtsch. U. Landsch.ökol.* 39 (3): 132–141

JENSSEN, M.; HOFMANN, G. (2009): Der klimaplastische Wald im nordostdeutschen Tiefland. Strategie der forstlichen Risikovorsorge angesichts einer unvorhersagbaren Zukunft. Schlussbericht (Nr. 8.2 NKBF 98) zum Forschungsvorhaben 0330562H: „Nachhaltige Entwicklung von Waldlandschaften im Nordostdeutschen Tiefland“ (NEWAL-NET). Teilprojekt B: „Modellierung der Waldstruktur-Dynamik standortspastischer Laubmischwälder und Regionalisierung von Schlüsselparametern für eine nachhaltige Waldentwicklung in der

Modellregion Nordost-Brandenburg/Südost-Mecklenburg-Vorpommern“. Abschlussbericht 199 S.

JÜTTE, K. (2007): 70 Jahre Waldentwicklung im Naturwaldreservat Heilige Hallen. Ergebnisse der Interpretation von Luftbildreihen. Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, A.ö.R., Schwerin, unv. Vortrag

BORRMANN, K. (2016): persönliche Mitteilung

KADRO, A (1981): Untersuchung der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände. Diss. Univ. Freiburg/Br. 215 S.

KAHL, T. (2008): Kohlenstofftransport aus dem Totholz in den Boden. Dissertation. Freiburg

KALLWEIT, R. (2015): persönliche Mitteilung

KÄTZEL, R. (2015): Vorlesungsskript Ökologische Genetik. Vorlesungsreihe HUB, LGF, (unv.)

KLAUS, G; BUHR, M. (1987) Philosophisches Wörterbuch 1/ 2. Verlag Das europäische Buch. Westberlin. 14. Auflage

KLESCHIN, A. (1960): Die Pflanze und das Licht. Akademie-Verlag Berlin 1960

KNAPP H. D. (2008): Buchenwälder als europäisches Naturerbe. 2. Hessisches Naturwaldforum Buche. 28.-29. April 2008 in Bad Wildungen. Mitteilungen der Hessischen Landesforstverwaltung, Band 47: 11–19

KONNERT, M.; ZIEHE, M.; TRÖBER, U.; MAURER, W.; JANßEN, A.; SANDER, T.; HUSSENDÖRFER, E.; HERTEL, H. (2000): Genetische Variation der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Deutschland: Gemeinsame Auswertung genetischer Inventuren über verschiedene Bundesländer Forst und Holz, 55. Jg: 403–408

KONNERT, M; KÄTZEL, R.; GEBHARDT, K. (2007): Abschlussbericht zum Forest Focus DE 2003–2004 C2-Projekt: „Erfassung und Monitoring der genetischen Diversität in Buchenpopulationen von Level-II-Flächen“

KONOPATZKY, A. (2001): Der Bodenzustand in den Wäldern Brandenburgs in: Forstliche Umweltkontrolle Ergebnisse aus zehnjährigen Untersuchungen zur Wirkung von Luftverunreinigungen in Brandenburgs Wäldern. LFE, Eberswalde und Potsdam 2001, S. 38–56

KOPP, D.; SCHWANECKE, W. (1994): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH

KORPEL, S. (1992): Ergebnisse der Urwaldforschung für die Waldwirtschaft im Buchen-Ökosystem. AFZ 21/1992, 1148–1152

KORPEL, S. (1995): Die Urwälder der Westkarpaten. Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer Verlag, 310 S.

KORPEL, S. (1997): Totholz in Naturwäldern und Konsequenzen für Naturschutz und Forstwirtschaft. Forst und Holz Nr. 21: 619–624

KRAKINA, O. N.; HARMON, M. E.; GRIAZKIN, A. V. (1999): Nutrient stores and dynamics of woody detritus in a boreal forest: modeling potential implications at the stand level. Can.J.For. Res. 29; 20–32

KRAUß, H. H.; HEINS DORF, D. (2008): Herleitung von Trockenmassen und Nährstoffspeicherungen in Buchenbeständen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 38. MLUV des Landes Brandenburg, Potsdam und Eberswalde

KRAUS, G. (1911): Boden und Klima auf kleinstem Raum: Versuch einer exakten Behandlung des Standorts auf dem Wellenkalk. Jena Fischer. 184 S.: Ill., graph. Darst.

KUUSELA, K. (1990): The dynamics of boreal coniferous forests. Helsinki, Finnish National Fund for Research and Development (SITRA).

- LEIBUNDGUT, H. (1959): Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 110, S. 900–907
- LEIBUNDGUT, H. (1993): Europäische Urwälder. Wegweiser zur naturnahen Waldwirtschaft. Verlag Paul Haupt. Bern und Stuttgart
- LEYER, I.; WESCHE, K.: Multivariate Statistik in der Ökologie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- LU M-V (2002): Richtlinie zur Sicherung von Alt- und Totholzanteilen im Wirtschaftswald. 16 S.
- LÜPKE, B. v. (1995): Überschirmungstoleranz von Stiel- und Traubeneichen als Voraussetzung für Verjüngungsverfahren unter Schirm. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 34, S. 141–160
- MANSIK, K.-H. (1971): Struktur und jahreszeitliche Entwicklung in Waldgesellschaften des nordbrandenburgischen und südmecklenburgischen Buchengebietes. Promotionsarbeit, ILN Halle (Saale)
- MAURER, W., CREMER, E.; DEGEN, B.; KONNERT, M.; TRÖBER, U.; JOLIVET, C.; LIESEBACH, H.; FLADUNG, M.; SCHNECK, V.; SCHOLZ, F.; KÖHL, M.; (2008): Endbericht zum Auftrag Erfassung genetischer Strukturen wichtiger Baumarten: Teillos 1: Erfassung der genetischen Struktur der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) als Grundlage für ein genetisches Monitoring wichtiger Waldbaumarten in Deutschland. FAWF Rheinland Pfalz, Staatsbetrieb Sachsenforst, Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Weltforstwirtschaft in Zusammenarbeit mit dem Thünen-Institut, Institut für Forstgenetik Großhandorf
- MAYER, H.; NEUMANN, M.; SOMMER, H. G. (1980): Bestandesaufbau und Verjüngungsdynamik unter dem Einfluß natürlicher Wilddichten im kroatischen Urwaldreservat Corkova Uvala/ Plitvicer Seen. Schweiz Z Forstwes 131: 45–70
- MAYER, H.; ZUKRIGL, K.; SCHREMP, W.; SCHLAGER, G. (1989): Urwaldreste, Naturwaldreservate und schützenswerte Naturwälder in Österreich. Universität für Bodenkultur Wien. 2. Auflage
- MEYER, P. (1999): Bestimmung der Waldentwicklungsphasen und der Texturdiversität in Naturwäldern. Allg. Forst-u.J. Ztg., 170Jg, 10–11: 203–211
- MEYER, P.; BARTSCH, N.; WOLFF, B. (2003): Methoden der Totholzerfassung im Wald Forstarchiv 74: 263–274
- MIL BRANDENBURG; MLUV MECKLENBURG-VORPOMMERN (2010): Biologische Vielfalt in den Wäldern Nordostdeutschlands. Studie der Landesforstverwaltungen der Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern auf der Grundlage ausgewählter Indikatoren. 47 S.
- MLINSEK, D. (1978): Brauchen wir Urwald?. Allg. Forst-Z. 3. S. 684–690
- MOROZOV, G. F (1949): Lehre des Waldes 7. Auflage Moskau
- MÜNCH, D. (1993): Bestandesdynamik in Bannwäldern – Eine Dauerbeobachtung in Luftbildzeitreihen. Dissertation Abteilung Luftbildmessung und Fernerkundung Universität Freiburg, 112 S.
- MUND, M. (2004): Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A, Bd. 189: 255 S.
- MÜLLER, J.; HOTHORN, T.; PRETZSCH, H. (2007): Long-term effects of logging intensity on structures, birds, saproxylic beetles and wood-inhabiting fungi in stands of European beech *Fagus sylvatica* L. Forest Ecology and Management 242: 297–305

- MÜLLER, M.; SEIFERT, S.; FINKELDEY, R. (2017): Comparison and confirmation of SNP-burst associations in European beech populations in Germany. *Tree Genetics & genomes*. 13 S (im Druck)
- MÜLLER-STARK, G. (1996): Genetische Aspekte der Reproduktion der Buche (*Fagus sylvatica* L.) unter Berücksichtigung waldbaulicher Gegebenheiten. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 153*, 103 S.
- MÜLLER-USING, S.; BARTSCH, N. (2003): Dynamics of woody debris in a beech stand (*Fagus sylvatica* L.) in Solling. Input, causes and decomposition of woody debris. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 174: 122–130
- MÜLLER-USING, S. (2005): Totholzdynamik eines Buchenbestandes im Solling. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe A, Bd. 193*: 175 S.
- MÜLLER-USING, S.; BARTSCH, N. (2007): Totholz im Elementhaushalt eines Buchenbestandes. *Forstarchiv* 78: 12–23
- MÜLLER-USING, S.; BARTSCH, N. (2009): Decay dynamic of coarse and fine woody debris of a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest in Central Germany. *Eur. J. Forest Res.* 128: 287–296
- NEI, M. (1972): Genetic distance between populations. *Am Nat.* 106: 283–292
- NOACK, M. (2014): Standortökologisch-biomathematische Grundlagen für die Umwandlung von Kiefernreinbeständen in Kiefern-Trauben-Eichen-Mischbestände. Ein Beitrag zur zukunftsorientierten Ressourcennutzung im Nordostdeutschen Tiefland. Verlag Dr. Kovac, 554 S.
- OBERDORFER, E. (1990): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. Sechste, überarbeitete und ergänzte Auflage. Ulmer Verlag
- OTTO, H.-J. (1997): Nachhaltige Waldbewirtschaftung und ihr Beitrag zum Naturschutz In: *Waldbewirtschaftung und Naturschutz im Wald - Einheit oder Widerspruch. Tagungsbericht des Brandenburgischen Forstvereins e. V. zur Jahrestagung 1997*: 23–32
- OTTO, H.-J. (2002): Antriebskräfte natürlicher Buchenwalddynamik in Europa. *Forst und Holz* 57: 649–653
- OTTO, H.-J. (2002b): Wachstum und Strukturbildung in europäischen Kiefernwäldern – Ein Beispiel für das Gesetz des Standortes- Teil II: Natürliche Walddynamik alter Kiefernwälder und waldbauliche Folgerungen. *Forst und Holz*, 57 Jg./ Nr. 18; 550–555
- PASSARGE, H. (1958): Vergleichende Betrachtung über das soziologische Verhalten einiger Waldpflanzen. *Archiv für Forstwesen* 7: 302–315
- PASSARGE, H.; HOFMANN, G. (1964): Soziologische Artengruppen mitteleuropäischer Wälder. *Archiv für Forstwesen* 13: 913–937
- PEAKALL, R.; SMOUSE, P.E. (2012): GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics* 28: 2537–2539
- PECK, A. K. (2004): Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. *Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg Nr. 10*. Dissertation. Freiburg
- PHUEKVILAI, P.; WOLFF, K. (2013): Characterisation of microsatellite loci in *Tilia platyphyllos* (Malvaceae) and cross – amplification in related species. *Applications in Plant Sciences* 1 (4): 1200386. Doi: <http://dx.doi.org/10.3732/apps.1200386>
- PINTARIC, K. (1978): Urwald Perucica als natürliches Forschungslaboratorium. *Allg. Forstzeitschrift* 24: 702–707
- QT READER: <http://appliedimagery.com> (Stand: 01.09.2016)

- PRUSA, E. (1985): Die böhmischen und mährischen Urwälder – ihre Struktur und Ökologie. ACADEMIA, Praha, 578 S.
- RADEMACHER, C.; NEUERT, CHR.; GRUNDMANN, V.; WISSEL, CHR.; GRIMM, V. (2001): Was charakterisiert Buchenurwälder? Untersuchungen der Altersstruktur des Kronendachs und der räumlichen Verteilung der Baumriesen in einem Modellwald mit Hilfe des Simulationsmodells BEFORE. Forstw. Cbl. 120; 288–302
- RAJENDRA, K.C.; SEIFERT, S.; PRINZ, K.; GAILING, O.; FINKELDEY, R. (2014): Subtle human impacts on neutral genetic diversity and spatial patterns of genetic variation in European beech (*Fagus sylvatica*). Forest Ecology and Management 319: 138–149
- REES, U. (1999): Lichtflecken und ihre Bedeutung für die CO₂-Aufnahme junger Buchen (*Fagus sylvatica* L.) im Unterwuchs des Buchenwaldes. Dissertation Göttingen
- RIEK, W.; STÄHR, F. (2004): Eigenschaften typischer Waldböden im Nordostdeutschen Tiefland unter besonderer Berücksichtigung des Landes Brandenburg. Hinweise für die Waldbewirtschaftung. EFS Band XIX
- ROSENKRANZ, L.; WIPPEL, B. (2012): Erhaltungszustandsbewertung und Maßnahmenplanung von FFH-Buchen-Lebensraumtypen. AFZ – Der Wald (20): 8/9
- RÜFFER, O. (2007): Entwicklungen in den Naturwäldern Brandenburgs. Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie 41; 67–81
- RÜFFER, O.; JÜTTE, K. (2010): Nutzung moderner Fernerkundungsverfahren für forstliche Fragestellungen am Beispiel der Wiederholungsinventur Kleiner Schwarzberg. In: Wissenstransfer in die Praxis – Beiträge zum fünften Winterkolloquium am 25. Februar 2010 in Eberswalde. EFS Band 44
- SCAMONI, A. (1957): Vegetationsstudien im Waldschutzgebiet „Fauler Ort“ und in den angrenzenden Waldungen. Sonderdruck aus Feddes Repertorium. Beiheft 137, S. 55–109
- SCAMONI, A.; PASSARGE, H. (1959): Gedanken zu einer natürlichen Ordnung der Waldgesellschaften. Archiv für Forstwesen 8: 386–426
- SCAMONI, A. (1960): Waldgesellschaften und Waldstandorte. 3. Aufl. Berlin
- SCHALL, P.; GOSSNER, M. M.; HEINRICHS, S.; FISCHER, M.; BOCH, S.; PRATI, D.; JUNG, K.; BAUMGARTNER, V.; BLASER, S.; BÖHM, S.; BUSCOT, F.; DANIEL, R.; GOLDMANN, K.; KAISER, K.; KAHL, T.; LANGE, M.; MÜLLER, J.; OVERMANN, J.; RENNER, S. C.; SCHULZE, E.-D.; SIKORSKI, J.; TSCHAPKA, M.; TÜRKE, M.; WESSER, W.W.; WEMHEUER, B.; WUBET, T.; AMMER, C. (2017): The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. Journal of Applied Ecology: 1–12
- SCHAUER, W. & MITARBEITER (1971): Erarbeitung von Vorschlägen für Handlungsrichtlinien für NSG mit Traubeneichen-Buchen-Waldbestockung im Pleistozängebiet der DDR. Forsch. Abschlußber., Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, ILN Halle (unv.)
- SCHMITHÜSEN, J. (1961): Allgemeine Vegetationsgeographie. 2. Aufl. Berlin.
- SCHOENICHEN, W. (1937): Urdeutschland 2. Band, Deutschlands Naturschutzgebiete in Wort und Bild. Verlag J. Neumann Neudamm Tafel 19. Aufnahme M. Jaedicke, Berlin
- SCHOPPA, F. M. (2000): Konsequenzen wald- und forstgeschichtlicher Entwicklungen für die aktuelle genetische Zusammensetzung von Waldbaumpopulationen in Mitteleuropa. Dissertation Göttingen
- SCHREMP, W. (1986): Waldbauliche Untersuchungen im Fichten-Tannen-Buchen-Urwald Rothwald und in Urwald-Folgebeständen. Wien: Verlag Verbandwiss. Ges. Österr.
- SCHWARZENBACH, F. H. (1987): Grundlagen für die Entwicklung einer allgemein anwendbaren Strategie zur Lösung ökologischer Probleme. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen

- SCHULTZE, J. H. (1955): Die Naturbedingten Landschaften der Deutschen Demokratischen Republik Ergänzungsheft Nr. 257 zu „Petermanns Geographischen Mitteilungen“ VEB Geographisch-Kartographische Anstalt Gotha
- SCHÜTZ, J-P. (2001): Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder Parey Buchverlag Berlin 207 S.
- SEA (1995): Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung). Stand 2005. Teil B: Praktisches Arbeitsverfahren, 2. Auflage der SEA 74
- SEDLACZEK, M. (2006): Vergleich von zeitlich verschiedenen Vegetationszuständen in zwei geschützten Buchenwaldgebieten Nordostdeutschlands. Diplomarbeit HNEE
- SILVERMAN, B. W. (1986): Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall
- STÄHR, F.; WEIß, S. (2004): Von der Pionierbestockung zum edellaubreichen Plenterwald? Historie, aktueller Entwicklungsstand und waldbauliche Perspektiven des Bestandes Liepe 15 a⁷ in der Oberförsterei Chorin. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol. 40 (2006): 97–105
- STARKE, R. (1996): Die Reproduktion der Buche (*Fagus sylvatica* L.) unter verschiedenen waldbaulichen Gegebenheiten. In: Müller-Stark, G. (Hrsg.) Biodiversität und nachhaltige Forstwirtschaft. Forum Genetik-Wald-Forstwirtschaft. Ecomed, Landsberg: 135–159
- STÖCKER, G. (1999): Merkmale und Typisierung von liegendem Totholz in Urwäldern und Naturwäldern mit Fichte und Kiefer. Beitr. Forstwirtsch. U. Landsch.ökol. (1): 24–32
- STRAUB, CH., SEITZ, R.; TROYCKE, A. (2011): Dreidimensionale Vermessung von Wäldern aus dem Flugzeug. LWF aktuell 84/2011: 44–46
- SUCK, R.; BUSHART, M.; HOFMANN, G.; SCHRÖDER, L. (2014): Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands. BfN Skripten 377
- SUKATSCHEW, W.N. (1950) Biogeozönose. Grosse Sowjetische Enzyklopädie, Bd. 5
- SUKATSCHEW, W.N. (1954): Die Grundlagen der Waldtypen. Festschrift Erwin Aichinger, Sonderf. d. Angew. Pflanzensoz. Band 77: 956–964. Wien.
- TABAKU, V. (1999): Struktur von Buchen-Urwäldern in Albanien im Vergleich mit deutschen Buchen-Naturwaldreservaten und -Wirtschaftswäldern. Dissertation Göttingen
- TARASIUK, S. (1999): Buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.) na obrzezach zasiegu w Polsce. Fundacja Rozwoj SGGW, Warszawa, 99 pp
- THORMANN, JEAN-JACQUES (1997): Zur Methodik der Lichtmessung im Wald. Ein Vergleich von LAI Plant Canopy Analyser, Fisheye-Foto und Horizontoskop, ETH Zürich
- VAN MIEGROET, M. (1996): Über Waldstabilität. Beitr. Forstwirtsch. U. Landsch. Ökol. Berlin 30: 49–57
- VORNAM, B.; DECARLI, N.; GAILING, O. (2004): Spatial distribution of genetic variation in a natural beech stand (*Fagus sylvatica* L.) based on microsatellite markers. Conservation Genetics 5: 561–570
- VORNAM, B. (2004A): Identifizierung von Buchenherkünften (*Fagus sylvatica* L.) mittels DNA-Markern. In: Hussendörfer, E. Herkunftssicherung und Zertifizierung von forstlichem Vermehrungsgut. Tagungsbericht der FVA Baden-Württemberg, Freiburg
- WAGNER, S., NAGEL, J. (1992): Ein Verfahren zur PC-gesteuerten Auswertung von Fish-eye Negativfotos für Strahlungsschätzungen. AFJZ 163.6: 110–116

- WAGNER, S. (1994): Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos. Methode und Anwendung. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Forstwissenschaftlichen Fachbereiches der Georg-August-Universität Göttingen
- WAGNER, S.; MÜLLER-USING, B. (1997): Ergebnisse der Buchen-Voranbauversuche im Harz unter besonderer Berücksichtigung der lichtökologischen Verhältnisse. Hrsg.: Landesanstalt für Ökologie, Bodenkunde und Forsten/ Landesamt für Agrarordnung NRW, LÖBF-Schriftenreihe, Band 13: 17–30
- WIESNER, J. (1907): Der Lichtgenuß der Pflanzen. Leipzig: Engelmann. 322 S.
- WINTER, S.; SCHUMACHER, H.; MÖLLER, G.; FLADE, M. (2002): Vom Reichtum des Alterns-Buchenaltholzbestände und ihr Beitrag zum Erhalt der Lebensgemeinschaft von Tieflandbuchenwäldern im nordostdeutschen Tiefland. Beitr. Forstwirtsch. U. Landsch.ökol. 36. 69–76
- WINTER, S.; FLADE, M.; MÖLLER, G.; SCHUMACHER, H. (2003): Naturschutzstandards für die Bewirtschaftung von Buchenwäldern im nordostdeutschen Tiefland. F+E Vorhaben Biologische Vielfalt und Forstwirtschaft. Sachbericht. Bundesamt für Naturschutz; Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg
- WINTER, S. (2005): Ermittlung von Struktur-Indikatoren zur Abschätzung des Einflusses forstlicher Bewirtschaftung auf die Biozönosen von Tiefland-Buchenwälder. Dissertation TU Dresden 322 S.
- WINTER, S.; BEGEHOLD, H.; HERRMANN, M.; LÜDERITZ, M.; MÖLLER, G.; RZANNY, M.; FLADE, M. (2015): Praxishandbuch – Naturschutz im Buchenwald: Naturschutzziele und Bewirtschaftungsempfehlungen für reife Buchenwälder Nordostdeutschlands. Potsdam: MLUL. 186 S.
- WOLFF, B.; ERHARD, M.; HOLZHAUSEN, M.; KUHLOW, T. (2003): Das Klima in den Forstlichen Wuchsgebieten Deutschlands. Mitteilungen der Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg
- WOLFF, B.; RIEK, W. (2005): Modellierung von Klimakennwerten für Monitoringpunkte in Wäldern Brandenburgs. Auftragsarbeit der Landesforstanstalt Eberswalde. Wald+Boden Umweltconsult GmbH (WBU)
- Wurm, A.; Fussli, B.; Konnert, M. (2016): Winterlinde – Vermehrungsgut, und genetische Aspekte. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. LWF Wissen 78: 14–19
- YATSKOV, M. (2000): A Chronosequence of Wood Decomposition in the Boreal Forests of Russia. Master of Science. Oregon State University

Erklärung des Promovenden

Hiermit erkläre ich, die Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfen und Hilfsmittel angefertigt zu haben. Ich habe mich anderwärts nicht um einen Doktorgrad beworben und besitze keinen entsprechenden Doktorgrad. Ich erkläre, dass ich die Dissertation oder Teile davon nicht bereits bei einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung eingereicht habe und dass sie dort weder angenommen noch abgelehnt wurde.

Ich erkläre die Kenntnisnahme der dem Verfahren zugrunde liegenden Promotionsordnung der Landwirtschaftlich Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin vom 14.07.2005.

Weiterhin erkläre ich, dass keine Zusammenarbeit mit gewerblichen Promotionsberatern stattgefunden hat und dass die Grundsätze der Humboldt-Universität zu Berlin zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten wurden.

Ort, Datum, Unterschrift

9. Anlagen

9.1 Abbildungsverzeichnis

Name	Kurztitel	Seite
0-1	Totholz im Faulen Ort	2. US
2.1-1	Lage des Untersuchungsgebietes	5
2.1-2	Digitales Geländemodell 2m mit DTK 25	6
2.1-3	Auszug geologisches Messischblatt Polssen	7
2.2-1	Durchschnittliche Niederschlagswerte der Wuchsbezirke	8
2.2-2	Anzahl der Sommertage (1950-2000) in Angermünde	10
2.2-3	Veränderungen der Stickstoffstufen im 20. Jahrhundert	11
2.2-4	Windrose der DWD Station Angermünde	12
2.2-5	Unterschicht mit Sambucus nigra im Faulen Ort	13
2.2-6	Karte des potentiellen natürlichen Vegetationspotentials	14
3.2-1	Mikrorelief der Versuchsflächen	17
3.2-2	Historischer Lageplan Versuchsfläche <i>Hang</i>	18
3.2-3	10 m x 10 m Rasteranlage für ökologische Untersuchungen	21
3.2-4	Übersichts- und Detailaufnahme Totholzbeprobung	24
3.2-5	Genetische Probennahme an Sommer- und Winter-Linde	28
4.1-1	Räumliche Darstellung der vorgefundenen Kalktiefen	32
4.2-1	Rekonstruktion der historischen Stammverteilungspläne	34
4.2-2	Hallenwaldstadium <i>Fauler Ort</i> Aufnahme 1938	35
4.2-3	Durchmesser-Höhen-Beziehungen der Rotbuchen Erstinventur	36
4.2-4	Kronenschirmflächen der Erstinventuren	38
4.2-5	Orthobild vom 16.6.1970	39
4.2-6	Vegetationshöhenmodell 1970	40
4.2-7	Ausschnitt Vegetationskarte <i>Fauler Ort</i> 1957	42
4.2-8	Stammverteilungsplan Wiederholungsinventur 2012	44
4.2-9	Zweidimensionales Vegetationshöhenmodell 2012	45
4.2-10	Panoramaaufnahme des Bestandes in der <i>Senke</i>	47
4.2-11	Panoramaaufnahme des Bestandes auf dem <i>Hang</i>	48
4.2-12	Panoramaaufnahme des Bestandes auf der <i>Kuppe</i>	49
4.2-13	Stangenholz auf der <i>Kuppe</i>	51
4.2-14	Durchmesser-Höhen-Beziehungen der Buche Gesamtschau	52
4.2-15	Durchmesser-Höhen-Beziehungen aller Baumarten der <i>Kuppe</i>	52
4.2-16	Durchmesser-Höhen-Beziehungen aller Baumarten des <i>Hangs</i>	53
4.2-17	Durchmesser-Höhen-Beziehungen aller Baumarten der <i>Senke</i>	54
4.2-18	Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell 1970	55
4.2-19	Vergleichende Darstellung Orthobilder 1970/ 1973	56
4.2-20	Orthobild 1978	57
4.2-21	Vergleichende Darstellung Orthobilder 1987/ 1991	58
4.2-22	Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell 1991	59
4.2-23	Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell 2012	60
4.2-24	Jahrringzuwachsverlauf von Bohrkernen Buche	61
4.2-25	Stammzahldichten Berg-Ahorn Erst- und Wiederholungsinventur	63
4.2-26	Stammzahldichten Buche Erst- und Wiederholungsinventur	64
4.2-27	Stammzahldichten Winter-Linde Erst- und Wiederholungsinventur	65
4.2-28	Stammzahldichten Sommer-Linde Erst- und Wiederholungsinventur	66
4.2-29	Karte der flächigen kartierten Vegetation	68
4.2-30	Bingelkrautfazies auf der <i>Kuppe</i>	69
4.2-31	Gierschfazies in der <i>Senke</i>	69
4.2-32	Perlgras mit Waldmeister am <i>Hang</i>	70
4.2-33	Dekadische Weiserwerte der Artengruppenkombinationen	71

4.2.-34	Kalktiefen und Artengruppenkombinationen der Vegetation	73
4.2.-35	Feld-Ahorn im Faulen Ort	80
4.2-36	Digitales Geländemodell der <i>Senke</i> mit Stammverteilung	84
4.2-37	Flächige Darstellung der Waldökosystemtypen	91
4.3-1	Zusammenhang Vegetation, Stickstoff und C/N-Verhältnis	97
4.3-2	Vergleichende Darstellung Kalktiefe und pH _{KCl} -Wert	98
4.3-3	Ökosystemabhängige Boxplots der Kalktiefe und Oberbodenwerte	101
4.3-4	Zusammenhang Waldökosystem, Stickstoff und C/N-Verhältnis	104
4.4-1	Liegendes Totholz Buche Nr. 50	105
4.4-2	Bestandesbild <i>Kuppe</i> mit <i>Sambucus nigra</i> und Totholz	108
4.4-3	Boxplots mit Analysewerten der Totholzauflage	109
4.4-4	Boxplots mit Analysenwerten der Totholzauflage und des Oberbodens (neben, unter und 1 m Entfernung vom Totholz)	110
4.4-5	Boxplots mit Analysenwerten des Oberbodens (neben, unter und 1 m Entfernung vom Totholz)	111
4.4-6	Fotografische Rekonstruktion des Bestandeszusammenbruchs	112
4.4-7	Längenmäßige Zusammensetzung des Totholzes (liegend)	113
4.4-8	Boxplots mit Analysenwerten des Oberbodens	116
4.5-1	Boxplots der Kronendachlücken im Strahlungsfrühjahr	124
4.5-2	Boxplots von DIFFSF, DIRSF und TOTSF im Strahlungsfrühjahr	125
4.5-3	Boxplots der Strahlung nach Wuchsklasse im Strahlungsfrühjahr	126
4.5-4	Flächige Darstellung von DIFFSF, DIRSF und TOTSF (Frühjahr)	128
4.5-5	Boxplots der Kronendachlücken im Sommer	129
4.5-6	Flächige Darstellung von DIFFSF, DIRSF und TOTSF (Sommer)	132
4.5-7	Boxplots der höhenklassenabhängigen Strahlung im Sommer	133
4.6-1	Heterozygote Allelhäufigkeiten der Buche	143
4.6-2	Mittels IDW interpolierte Heterozygotiewerte der Buchen	144
4.6-3	Seltene Allele [5 %] der Buche	145
4.6-4	Seltene Allele [1 %] der Buche	146
4.6-5	Anteile von Winter- und Sommer-Linden je Untersuchungsfläche	149
4.6-6	Heterozygote Allelhäufigkeiten der Winter- und Sommer-Linde	152
4.6-7	Seltene Allele [5 %] der Winter- und Sommer-Linde	153
5-1	Vegetationshöhenmodelle aus den Jahren 1970, 1991, 2012	165
5-2	Wuchsklassenmodelle aus den Jahren 1970, 1991, 2012	166
5-3	Waldentwicklungsphasen 1991 und 2012	167
5-4	Disintegrations- und Formierungsstadium im Norden des <i>Hangs</i>	168
5-5	Feld-Ahornsolitär (Baumholzdimension) 200 m nördlich der Flächen	177

9.2 Tabellenverzeichnis

Name	Kurztitel	Seite
2.2-1	Ausgesuchte Klimawerte der Sommermonate	9
3.2-1	Gegenüberstellung Waldentwicklungsphasenklassifikation	19
3.2-2	Aus dem Vegetationshöhenmodell klassifizierte Wuchs- und Höhenklassen	20
3.2-3	Verwendete Labormethoden und Parameter	22
3.2-4	Dekadische Kennziffern und deren standörtliche Interpretation	27
3.2-5	Analysierte Kernmikrosatelliten-Genorte bei Buche und Linden	29
4.2-1	Ausgewählte holzmesskundliche Werte der Erstinventuren	36
4.2-2	Baumartenzusammensetzung der Untersuchungsflächen (Erstinventur)	37
4.2-3	Kronenschirmflächenwerte der Erstinventuren	41

4.2-4	Ausgewählte holzmesskundliche Werte der Wiederholungsinventur	46
4.2-5	Angaben zum Grundflächenmittelstamm Wiederholungsinventur	50
4.2-6	Kronenschirmflächenanteile der Wuchsklassen	50
4.2-7	Dimension der Kronenschirmflächen in der Wiederholungsinventur	51
4.2-8	Mittelwerte des D_{KF} , D_{KT} , D_{KV} der Artengruppenkombinationen	71
4.2-9	Varianzanalysenergebnisse der D_{KF} , D_{KT} , D_{KV} -Werte	72
4.2-10	Test auf Homogenität der Varianzen	72
4.2-11	Ergebnisse paarweiser Signifikanzprüfung der D_{KF} , D_{KT} , D_{KV} Werte	72
4.2-12	Varianzanalysenergebnis der vegetationsabhängigen Kalktiefen	73
4.2-13	Test auf Homogenität der Varianzen	74
4.2-14	Ergebnisse paarweiser Signifikanzprüfung der vegetationsabhängigen Kalktiefen	74
4.2-15	Dekadische Oberbodenzustandswerte der Flächen	74
4.2-16	Gegenüberstellung der Differentialarten für Wärme (Wärmezeiger)	76
4.2-17	Gegenüberstellung der Differentialarten für Kühle (Kühlezeiger)	77
4.2-18	Flächenspezifische Deckungsgrade der Kühlezeiger	78
4.2-19	Flächenspezifische Deckungsgrade der Wärmezeiger	79
4.2-20	Ergebnisse der methodenvergleichenden Vegetationsanalyse	80
4.2-21	Regressionskoeffizientenwerte für die Buche in allen Flächen	83
4.2-22	Regressionskoeffizientenwerte für die Buche (<i>Hang</i> und <i>Kuppe</i>)	83
4.2-23	Regressionskoeffizientenwerte für die Buche (<i>Senke</i>)	84
4.2-24	Regressionskoeffizientenwerte für den Berg-Ahorn in allen Flächen	85
4.2-25	Regressionskoeffizientenwerte für den Berg-Ahorn (ohne <i>Senke</i>)	85
4.2-26	Regressionskoeffizientenwerte für den Berg-Ahorn (<i>Senke</i>)	86
4.2-27	Regressionskoeffizientenwerte für die Sommer-Linde in allen Flächen	86
4.2-28	Regressionskoeffizientenwerte für die Sommer-Linde (ohne <i>Senke</i>)	87
4.2-29	Regressionskoeffizientenwerte für die Sommer-Linde (<i>Senke</i>)	87
4.2-30	Regressionskoeffizientenwerte für die Winter-Linde in allen Flächen	88
4.2-31	Regressionskoeffizientenwerte für die Winter-Linde (ohne <i>Senke</i>)	88
4.2-32	Regressionskoeffizientenwerte für die Winter-Linde (<i>Senke</i>)	89
4.2-33	Zusammenfassende Übersicht über die Wirkung der Regressionskoeffizienten	89
4.3-1	Deskriptive Statistik der Laborergebnisse Tiefenstufe (0–5cm)	95
4.3-2	Varianzanalysenergebnisse der Oberbodenwerte, gruppiert nach Vegetation	95
4.3-3	Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stickstoff-Vegetation	95
4.3-4	Bodenchemische Mittelwerte der Artengruppenkombinationen	96
4.3-5	Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Standortfaktoren	99
4.3-6	Varianzanalysenergebnisse Oberboden-Waldökosystem	100
4.3-7	Test auf Homogenität der Varianzen	100
4.3-8	Tabelle Rang	100
4.3-9	Kruskal-Wallis-Teststatistik	100
4.3-10	Mittelwerte der bodenchemischen Untersuchungen	102
4.3-11	Ergebnisse paarweiser Signifikanzprüfung Oberbodenanalysen-Ökosystem	103
4.4-1	Trockenmassen und Elementvorräte von zehn Einzelbuchen	106
4.4-2	Einzelbaumbezogener Kohlenstoff- und Stickstoffabbau sowie Restvorrat	107
4.4-3	Gegenüberstellung N- und C-Anteile im Oberboden (1968–2004)	108
4.4-4	Deskriptive Statistik Analysenergebnisse der Tothholzaufgabe	109

4.4-5	Deskriptive Statistik Analysenergebnisse der Oberbodenwerte (Totholz)	113
4.4-6	Varianzanalysenergebnisse Oberboden-Entnahmeort	114
4.4-7	Test auf Homogenität der Varianzen	114
4.4-8	Gemittelte Ränge und Gruppengrößen der Bodenparameter	114
4.4-9	Kruskal-Wallis-Teststatistik	115
4.4-10	Ergebnisse des Dunn-Bonferroni-Tests	115
4.4-11	Oberhöhen der Buchen in der Erst- und Wiederholungsinventur	120
4.5-1	Varianzanalysenergebnisse Strahlungsgrößen-Wuchsklassen	126
4.5-2	Test auf Homogenität der Varianzen	126
4.5-3	Kruskal-Wallis-Teststatistik	127
4.5-4	Varianzanalysenergebnisse Strahlungsgrößen-Waldökosystem	130
4.5-5	Test auf Homogenität der Varianzen	130
4.5-6	Ergebnisse paarweiser Signifikanzprüfung der Strahlungswerte	131
4.5-7	Varianzanalysenergebnisse Strahlungsgrößen-Höhenklassen	134
4.5-8	Test auf Homogenität der Varianzen	134
4.5-9	Tabelle Rang	134
4.5-10	Kruskal-Wallis-Teststatistik	135
4.5-11	Strahlungsuntersuchungen zu PAR in Buchenwäldern	137
4.5-12	Relative Beleuchtungsstärke in Buchenlücken	138
4.6-1	Genetische Diversitätswerte der Buchen	141
4.6-2	Genetischer Abstand zwischen den drei Buchenflächen	141
4.6-3	Genetische Diversitätswerte der Durchmesserklassen der Buchen	142
4.6-4	Genetischer Abstand zwischen den Durchmesserklassen der Buche	142
4.6-5	Flächen- und ökosystembezogene Anzahl seltener Allele der Buche	147
4.6-6	Zusammensetzung der Lindenbestockung in den drei Flächen	148
4.6-7	Genetische Diversitätswerte der beiden Lindenarten	149
4.6-8	Genetische Diversitätswerte der drei Flächen anhand von elf Genorten	150
4.6-9	Genetischer Abstand zwischen den drei Lindenflächen	150
4.6-10	Genetische Diversitätswerte der Durchmesserklassen der Linden	151
4.6-11	Genetischer Abstand zwischen den Durchmesserklassen der Linden	151
4.6-12	Ergebnisse der Genanalysen hochgerechnet auf die absoluten Stammzahlen der Sommer-Linde	154
4.6-13	Ergebnisse der Genanalysen hochgerechnet auf die absoluten Stammzahlen der Winter-Linde	154
4.6-14	Ausgesuchte genetische Variabilitätswerte von Buchenbeständen	156
4.6-15	Vergleichende Darstellung genetischer Diversitätswerte von Sommer- und Winter-Linden-Beständen	158
5-1	Dynamik im Abbau und der Zersetzung des Altbestandes	171

9.3 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Anm. d. Verf.	Anmerkung des Verfassers
BAH	Berg-Ahorn
BHD	Brusthöhendurchmesser
BRA	Betriebsregelungsanweisung Landeswald
BZE	Bestandeszustandserfassung
C/N	Kohlenstoff/ Stickstoffverhältnis

D _{1,3}	Durchmesser in 1,3 m Höhe
DGM 2 m	Amtliches Digitales Geländemodell 2 m
DHHN 1992	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DIFFSF	Diffuse Site Factor
DG	Grundflächenmittelstamm
DIRSF	Direct Site Factor
DK _{C/N}	Dekadische Kennziffer Stickstoffgehalt der Bodensubstanz
DK _F	Dekadische Kennziffer Feuchte des Oberbodens
DK _T	Dekadische Kennziffer Trophie des Oberbodens
DK _{V/%}	Dekadische Kennziffer Basensättigung des Oberbodens
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSW	Datenspeicher Wald
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETRS-89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
fm	Festmeter
GIS	Geografisches Informationssystem
HBU	Handbuch für Bodenuntersuchung
HBU	Hainbuche
[He]	erwarteter prozentualer Anteil heterozygoter Individuen
[Ho]	prozentualer Anteil heterozygoter Individuen
HFA	Handbuch Forstliche Analytik
HNEE	Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde
IDW	Inverse Distanzwichtung
ILN	Institut für Landschaftsnutzung und Naturschutz
nDOM	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell
[Na]	Anzahl der Allele
[Ne]	mittlere effektive Anzahl von Allelen
[Np]	Anzahl der privaten Allele
NHN	Normal Höhen Null
NN	Nord
NNO	Nordnordost
NNW	Nordnordwest
NSG	Naturschutzgebiet
N _{org} in % von C _{org}	Organischer Stickstoff in Prozent vom organischen Kohlenstoff
OEWK	Ökologische Dauerbeobachtung
OO	Ost
RBU	Rot-Buche
RGB(I)	Rot-Grün-Blau (Infrarot) Luftbild
SAH	Spitz-Ahorn
SEA 95	Standortserkundungsanleitung 1995
SLI	Sommer-Linde
SS.	Süd
SSO	Südsüdost
SSW	Südsüdwest
SSW	Südsüdwest
STM m. R.	Trockenmasse des Schaftes mit Rinde
Tab.	Tabelle

TK 25	Topografische Karte im Maßstab 1: 25000
TM Dendro gesamt	Trockenmasse der oberirdischen Dendromasse
TOTSF	Total Site Factor
UTM	Universal Transverse Mercator
VHM	Vegetationshöhenmodell (forstlicher Begriff für nDOM)
WLI	Winter-Linde
WSW	Westsudwest
WW	West
WNW	Westnordwest

9.4 Anlagen Ergebnisteil

Die Anlagen Ergebnisteil liegen der Arbeit auf einem Datenträger (CD-ROM) gespeichert bei und gliedern sich in folgende 17 Teile:

- Tab. 9.4-1:** Per Bohrstock rasterbezogen ermittelte Kalktiefen sowie bodenchemische Analysewerte der Tiefenstufe (0–5 cm)
- Tab. 9.4-2:** Deskriptive Statistik der 10 m x 10 m Rasterbeprobung Tiefenstufe (0–5 cm)
- Tab. 9.4-3:** Analysewerte der Totholzbeprobung (am, unter, neben liegendem Totholz)
- Tab. 9.4-4:** Wärmezeiger DKF-Wert 4 (Hofmann & Pommer 2013, 32 ff.)
- Tab 9.4-5:** Mäßig Wärme bis Wärmezeiger, Zeigerwert T = 6 (Ellenberg 2000)
- Tab.9.4-6:** Ergebnisse der rasterbezogenen lichtökologischen Untersuchungen im belaubten Sommerhalbjahr
- Tab.9.4-7:** Ergebnisse der rasterbezogenen lichtökologischen Untersuchungen im Strahlungsfrühjahr
- Tab.9.4-8:** Übersicht über die Ergebnisse an 10 Mikrosatellitenorten der Buche
- Tab.9.4-9:** Übersicht über die genetischen Untersuchungsergebnisse der Linden an 12 Mikrosatellitenorten
- Tab.9.4-10:** Kluppliste der Erstinventur Fläche *Hang* 1968
- Tab.9.4-11:** Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Hang* 2012
- Tab.9.4-12:** Kluppliste der Erstinventur Fläche *Kuppe* 1958
- Tab.9.4-13:** Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Kuppe* 2012
- Tab.9.4-14:** Kluppliste der Erstinventur Fläche *Senke* 1958
- Tab.9.4-15:** Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Senke* 2012
- 9.4-16:** Auswertebericht Berechnung Oberflächenmodell 1970 mit Agisoft Photoscan Professional
- 9.4-17:** Auswertebericht Berechnung Oberflächenmodell 1991 mit Agisoft Photoscan Professional

9.4 Anlagen Ergebnisteil

Tab. 9.4-1: Per Bohrstock rasterbezogen ermittelte Kalktiefen sowie bodenchemische Analysewerte der Tiefenstufe (0-5 cm)

Rasterpunkt	pH (KCl)	C _{Ges} (%)	N _{Ges} (%)	C/N	N%von_C	Kalktiefe (m)
1	4,600	4,850	0,297	16,330	6,124	0,58
10	5,460	4,420	0,295	14,983	6,674	0,55
11	4,960	2,310	0,161	14,348	6,970	0,70
12	5,330	2,400	0,172	13,953	7,167	1,50
13	6,330	2,950	0,215	13,721	7,288	1,40
14	4,780	1,840	0,139	13,237	7,554	1,50
15	6,330	2,500	0,200	12,500	8,000	1,50
16	6,190	2,950	0,211	13,981	7,153	0,70
17	7,110	3,220	0,262	12,290	8,137	0,45
20	5,600	3,280	0,223	14,709	6,799	1,50
21	5,320	2,200	0,171	12,865	7,773	0,80
22	6,940	3,140	0,233	13,476	7,420	0,40
23	7,210	2,950	0,234	12,607	7,932	0,10
24	5,670	4,180	0,245	17,061	5,861	0,55
25	6,020	4,100	0,270	15,185	6,585	0,90
30	6,630	5,420	0,305	17,770	5,627	0,50
31	5,120	3,360	0,246	13,659	7,321	0,80
32	5,530	6,120	0,343	17,843	5,605	0,60
33	7,130	4,330	0,329	13,161	7,598	0,55
34	5,820	2,390	0,193	12,383	8,075	2,00
35	4,530	2,040	0,157	12,994	7,696	0,45
40	4,070	3,910	0,250	15,640	6,394	0,75
41	4,920	3,000	0,202	14,851	6,733	0,75
42	5,320	3,670	0,262	14,008	7,139	0,52
43	6,060	3,460	0,259	13,359	7,486	0,70
44	5,320	1,970	0,154	12,792	7,817	0,60
45	6,120	2,840	0,194	14,639	6,831	1,00
46	4,470	3,080	0,212	14,528	6,883	0,95
47	5,010	3,000	0,204	14,706	6,800	1,50
50	4,340	3,700	0,239	15,481	6,459	1,25
51	4,180	2,570	0,185	13,892	7,198	-
52	4,240	2,110	0,156	13,526	7,393	-

Fortsetzung **Tabelle 9.4-1**

Rasterpunkt	pH (KCl)	C_{Ges} (%)	N_{Ges} (%)	C/N	N%von_C	Kalktiefe (m)
53	5,910	2,870	0,215	13,349	7,491	0,70
54	5,300	2,090	0,152	13,750	7,273	0,60
55	5,940	2,620	0,178	14,719	6,794	-
56	4,880	2,470	0,173	14,277	7,004	-
57	4,800	3,690	0,239	15,439	6,477	-
58	6,460	3,180	0,229	13,886	7,201	2,10
59	5,420	3,150	0,206	15,291	6,540	2,10
60	4,620	2,900	0,207	14,010	7,138	1,30
61	5,390	3,440	0,230	14,957	6,686	
62	5,470	2,970	0,205	14,488	6,902	
63	4,930	3,480	0,218	15,963	6,264	
64	7,160	2,860	0,206	13,883	7,203	0,13
65	7,060	3,650	0,265	13,774	7,260	0,60
66	4,920	2,320	0,172	13,488	7,414	1,50
67	5,170	2,180	0,167	13,054	7,661	2,10
68	7,070	3,200	0,257	12,451	8,031	2,10
69	5,400	2,560	0,174	14,713	6,797	2,10
70	5,990	2,580	0,187	13,797	7,248	-
71	5,320	2,550	0,186	13,710	7,294	1,10
72	5,550	2,630	0,187	14,064	7,110	-
73	6,830	2,060	0,159	12,956	7,718	-
74	6,870	3,260	0,252	12,937	7,730	0,85
75	5,600	2,370	0,172	13,779	7,257	-
76	5,900	2,490	0,184	13,533	7,390	-
77	6,480	2,570	0,202	12,723	7,860	2,10
78	5,770	2,540	0,189	13,439	7,441	-
79	6,150	3,340	0,211	15,829	6,317	-
80	6,000	2,940	0,202	14,554	6,871	1,20
81	4,380	2,470	0,180	13,722	7,287	-
82	5,190	2,660	0,202	13,168	7,594	-
83	4,620	3,100	0,203	15,271	6,548	-
84	4,880	2,410	0,180	13,389	7,469	1,10
85	5,610	2,030	0,151	13,444	7,438	-
86	5,400	2,910	0,201	14,478	6,907	-
87	5,310	2,380	0,157	15,159	6,597	2,10

Fortsetzung **Tabelle 9.4-1**

Rasterpunkt	pH (KCl)	C_{Ges} (%)	N_{Ges} (%)	C/N	N%von_C	Kalktiefe (m)
88	5,370	2,360	0,174	13,563	7,373	-
89	6,130	2,680	0,200	13,400	7,463	-
90	6,690	2,470	0,194	12,732	7,854	1,65
91	5,550	2,310	0,166	13,916	7,186	0,85
92	4,900	2,840	0,189	15,026	6,655	-
93	4,750	3,300	0,214	15,421	6,485	-
94	5,080	3,110	0,208	14,952	6,688	2,20
95	4,180	2,900	0,196	14,796	6,759	2,10
96	5,020	1,940	0,136	14,265	7,010	-
97	6,660	4,170	0,306	13,627	7,338	-
98	6,840	7,890	0,611	12,913	7,744	-
99	6,730	3,500	0,245	14,286	7,000	1,10
100	5,370	3,750	0,219	17,123	5,840	2,10
101	5,450	2,200	0,152	14,474	6,909	-
102	5,330	1,760	0,126	13,968	7,159	-
103	4,830	2,390	0,171	13,977	7,155	1,05
104	4,780	2,880	0,181	15,912	6,285	1,40
105	4,100	2,330	0,166	14,036	7,124	2,00
106	5,400	3,370	0,231	14,589	6,855	1,70
107	3,800	1,690	0,131	12,901	7,751	0,55
108	6,150	2,520	0,177	14,237	7,024	0,77
109	6,540	3,170	0,211	15,024	6,656	0,55
110	5,170	2,540	0,178	14,270	7,008	-
111	5,850	2,750	0,176	15,625	6,400	2,10
113	4,070	2,000	0,148	13,514	7,400	0,40
114	4,410	3,390	0,220	15,409	6,490	-
115	5,480	2,180	0,159	13,711	7,294	-
116	3,710	3,060	0,209	14,641	6,830	-

Tab. 9.4-2: Deskriptive Statistik der 10 m x 10 m Rasterbeprobung Tiefenstufe (0-5 cm)

Übersicht nach Vegetationsgruppen						
Artengruppenkombination		pHK(CI)	N% von C	N _{Ges} (%)	C/N	C _{Ges} (%)
Mercurialis Gruppe	N	48	48	48	48	48
	Mittelwert	5,75	7,14	,21	14,12	2,94
	Median	5,64	7,25	,20	13,79	2,85
	Standardfehler des Mittelwertes	,13	,088	,0069	,1909	,124
	Minimum	3,71	5,60	,13	12,3	1,7
	Maximum	7,21	8,14	,34	17,84	6,12
	Standardabweichung	,929	,610	,0478	1,323	,862
	Gruppiertes Median	5,64	7,25	,20	13,79	2,85
Melica-Lamium Gruppe	N	13	13	13	13	13
	Mittelwert	5,07	6,78	,212	14,78	3,14
	Median	5,01	6,69	,208	14,95	3,11
	Standardfehler des Mittelwertes	,1825	,089	,0058	,186	,103
	Minimum	4,07	6,39	,17	13,35	2,56
	Maximum	6,46	7,49	,25	15,640	3,91
	Standardabweichung	,657	,320	,0208	,676	,376
	Gruppiertes Median	5,01	6,688	,208	14,95	3,11
Aegopodium-Lamium Gruppe	N	31	31	31	31	31
	Mittelwert	5,37	7,056	,193	14,23	2,76
	Median	5,17	7,01	,184	14,26	2,54
	Standardfehler des Mittelwertes	,1028	,079	,007	,163	,125
	Minimum	4,10	6,12	,136	12,38	1,84
	Maximum	6,15	8,08	,297	16,33	4,85
	Standardabweichung	,572	,44	,039	,905	,696
	Gruppiertes Median	5,22	7,02	,184	14,266	2,52
Ohne Vegetation	N	3	3	3	3	3
	Mittelwert	6,86	7,70	,39	12,99	5,087
	Median	6,84	7,740	,306	12,91	4,17
	Standardfehler des Mittelwertes	,119	,201	,111	,342	1,43
	Minimum	6,66	7,34	,26	12,45	3,20
	Maximum	7,07	8,03	,611	13,63	7,89
	Standardabweichung	,206	,348	,191	,593	2,476
	Gruppiertes Median	6,840	7,74	,306	12,91	4,17
Insgesamt	N	95	95	95	95	95
	Mittelwert	5,5	7,08	,209	14,21	2,98
	Median	5,40	7,153	,202	13,98	2,87
	Standardfehler des Mittelwertes	,088	,055	,0062	,117	,094
	Minimum	3,71	5,60	,13	12,29	1,69
	Maximum	7,21	8,14	,61	17,84	7,890
	Standardabweichung	,8576	,54	,0602	1,14	,915
	Gruppiertes Median	5,40	7,15	,20	13,98	2,87

Tab. 9.4-3: Analysewerte der Tothholzbeprobung (am, unter, neben liegenden Tothholz)

Proben-Nr.	Baum-nummer	Schicht	C _{Ges} (%)	N _{Ges} (%)	Glühverlust (%)
1	28 HKK	Auflage1	39,64	1,083	71,56
2	28 HKK	Auflage2	52,60	1,164	92,84
3	28 HKK	Auflage3	30,98	1,254	56,16
4	28 HKK	Ah 1	3,35	0,201	6,75
5	28 HKK	Ah 2	3,67	0,236	7,08
6	28 HKK	Ah 3	2,40	0,174	4,73
7	28 HKK	Ah 3s	9,10	0,462	16,40
8	28 HKK	Ah 2s	7,57	0,449	14,78
9	28 HKK	Ah 2s	4,20	0,288	8,40
10	28 HKK	Ah1s	4,91	0,306	9,67
11	8 HKK	Auflage1	38,17	1,615	69,23
12	8 HKK	Auflage2	46,07	1,852	83,12
13	8 HKK	Auflage3	47,71	1,236	88,15
14	8 HKK	Ah 3	3,77	0,189	7,06
15	8 HKK	Ah 1	4,19	0,183	7,87
16	8 HKK	Ah 2	2,85	0,154	5,50
17	8 HKK	Ah 1s	3,80	0,250	7,19
18	8 HKK	Ah 2s	3,39	0,212	6,43
19	8 HKK	Ah 3s	6,87	0,378	13,21
20	8 HKK	Ah2s	2,57	0,183	5,04
21	24 HKK	Auflage2	35,60	1,495	63,39
22	24 HKK	Auflage3	48,25	1,635	85,92
23	24 HKK	Auflage1	45,63	1,779	83,02
24	24 HKK	Ah 1	2,87	0,175	5,52
25	24 HKK	Ah 2	3,01	0,188	5,62
26	24 HKK	Ah 3	4,60	0,267	8,84
27	24 HKK	Ah 1s	5,02	0,319	9,50
28	24 HKK	Ah 2s	7,18	0,372	13,08
29	24 HKK	Ah 2s	5,80	0,385	10,92
30	24 HKK	Ah 3s	4,21	0,264	8,05
31	50 Man	Auflage1	33,91	1,296	61,99
32	50 Man	Auflage2	27,96	0,886	48,22
33	50 Man	Auflage3	31,24	1,089	53,30
34	50 Man	Ah 3	2,69	0,164	5,35
35	50 Man	Ah 2	2,81	0,152	5,33
36	50 Man	Ah 1	4,18	0,246	8,01
37	50 Man	Ah 1s	3,43	0,187	6,54
38	50 Man	Ah 2s	11,40	0,439	21,09
39	50 Man	Ah 2s	2,38	0,162	4,64
40	50 Man	Ah3s	3,55	0,197	6,83
41	99 MAN	Auflage1	55,91	0,926	96,22
42	99 MAN	Auflage2	54,59	0,848	96,93
43	99 MAN	Auflage3	54,87	0,999	95,95
44	99 MAN	Ah 1	3,04	0,178	5,76
45	99 MAN	Ah 2	2,66	0,171	5,14
46	99 MAN	Ah 3	4,61	0,197	8,56
47	99 MAN	Ah 1s	7,88	0,363	14,95
48	99 MAN	Ah 2s	2,93	0,192	5,60

Fortsetzung **Tabelle 9.4-3**

Proben-Nr.	Baum-nummer	Schicht	C _{Ges} (%)	N _{Ges} (%)	Glühverlust (%)
49	99 MAN	Ah 3s	6,37	0,268	11,81
50	99 MAN	Ah2s	5,15	0,288	9,59
51	2 MAN I	Auflage1	40,88	0,988	72,34
52	2 MAN I	Auflage3	50,21	1,281	89,74
53	2 MAN I	Auflage2	50,83	1,288	91,80
54	2 MAN I	Ah 1	2,53	0,161	5,13
55	2 MAN I	Ah 2	2,43	0,171	4,75
56	2 MAN I	Ah 3	2,25	0,161	4,50
57	2 MAN I	Ah 1s	2,43	0,175	4,74
58	2 MAN I	Ah 2s	2,93	0,216	6,13
59	2 MAN I	Ah 3s	2,91	0,218	5,59
60	2 MAN I	Ah2s	3,06	0,225	5,96
61	2 MAN II	Auflage1	51,55	1,513	92,37
62	2 MAN II	Auflage2	49,17	1,335	85,88
63	2 MAN II	Auflage3	47,37	1,226	84,13
64	2 MAN II	Ah 1	4,18	0,249	8,39
65	2 MAN II	Ah 2	4,00	0,226	8,00
66	2 MAN II	Ah 3	7,35	0,342	14,15
67	2 MAN II	Ah 1s	3,92	0,214	7,87
68	2 MAN II	Ah 2s	6,62	0,337	13,18
69	2 MAN II	Ah 3s	2,00	0,115	4,28
70	2 MAN II	Ah2s	4,54	0,308	8,76
71	10 HKS	Auflage1	48,48	1,292	83,30
72	10 HKS	Auflage2	54,56	1,173	94,07
73	10 HKS	Auflage3	54,34	1,120	93,68
74	10 HKS	Ah 1	3,65	0,233	6,90
75	10 HKS	Ah 2	2,54	0,174	4,86
76	10 HKS	Ah 3	2,09	0,131	4,04
77	10 HKS	Ah 1s	3,14	0,202	6,08
78	10 HKS	Ah 2s	6,63	0,313	12,76
79	10 HKS	Ah 3s	3,31	0,177	6,54
80	10 HKS	Ah2s	2,10	0,141	4,25
81	5 HKS	Auflage1	51,50	1,370	89,17
82	5 HKS	Auflage2	54,59	1,361	94,62
83	5 HKS	Auflage3	55,49	1,029	94,54
84	5 HKS	Ah 1	4,03	0,260	8,04
85	5 HKS	Ah 2	4,22	0,242	8,04
86	5 HKS	Ah 3	5,86	0,271	11,02
87	5 HKS	Ah 1s	3,73	0,266	7,44
88	5 HKS	Ah 2s	3,59	0,258	7,22
89	5 HKS	Ah 3s	7,00	0,337	12,97
90	5 HKS	Ah2s	3,93	0,274	7,77
91	34 HKS	Auflage1	42,41	1,611	74,26
92	34 HKS	Auflage2	49,68	1,253	84,56
93	34 HKS	Auflage3	49,62	1,251	91,67
94	34 HKS	Ah 1	3,39	0,206	6,58
95	34 HKS	Ah 2	4,22	0,197	8,26

Fortsetzung **Tabelle 9.4-3**

Proben-Nr.	Baum-nummer	Schicht	C_{Ges} (%)	N_{Ges} (%)	Glühverlust (%)
96	34 HKS	Ah 3	2,36	0,156	4,82
97	34 HKS	Ah 1s	3,38	0,228	6,64
98	34 HKS	Ah 2s	4,75	0,263	9,17
99	34 HKS	Ah 3s	2,38	0,146	4,84
100	34 HKS	Ah2s	6,48	0,356	12,33
101	4 HKS	Auflage1	48,57	1,417	88,81
102	4 HKS	Auflage2	50,84	1,300	90,56
103	4 HKS	Auflage3	49,87	1,345	88,72
104	4 HKS	Ah 1	2,21	0,153	4,43
105	4 HKS	Ah 2	3,00	0,226	6,11
106	4 HKS	Ah 3	3,22	0,239	6,39
107	4 HKS	Ah 1s	2,56	0,181	5,18
108	4 HKS	Ah 2s	3,87	0,279	7,64
109	4 HKS	Ah 3s	5,77	0,363	10,92
110	4 HKS	Ah2s	2,40	0,199	4,85

Tab. 9.4-4: Wärmezeiger DK_{Feuchte} - Wert 4 (Hofmann & Pommer 2013, 32ff.)

Wärmezeiger DK _{Feuchte} Wert 4		prozentualer Deckungsgrad in der Parzelle der Fläche			
Schicht	Art	Senke	Hang	Oberhang	Kuppe
Obere Baumschicht	Tilia platyphyllos	20		0,2	10
	Tila cordata	1			45
Untere Baumschicht	Acer platanoides				
	Tilia platyphyllos				2
	Tila cordata				18
Strauchschicht1	Acer platanoides	1			
	Tilia platyphyllos	3		0,2	0,2
	Tila cordata	0,2			1
Strauchschicht2	Euonymus europaea			0,2	0,2
	Acer platanoides	1	0,2	2	0,01
	Carpinus betulus	0,01			
	Quercus petraea			0,01	0,01
	Tilia platyphyllos	1	0,01	2	0,01
	Tila cordata				1
Krautschicht & Moosschicht	Alliaria petiolata	0,01	0,01		0,2
	Veronica hederifolia	0,2	0,01		
	Hepatica nobilis		0,01	0,2	1
	Lathyrus vernus	0,01		0,01	0,2
	Brachypodium sylvaticum			0,01	0,2
	Elymus caninus				0,01
	Poa nemoralis			0,01	0,2
Keimschicht	Quercus spec.	0,01			
	Tilia cordata		0,01		0,01
	Tilia platyphyllos			0,2	
	Acer campestre				0,01
Deckungsgrad nur Arten DK _{Feuchte} 4		27,44	0,25	5,04	79,26
Deckungsgrad (alle Arten und Schichten)		285,12	289,11	217,28	313,53
Artenzahl DK_{Feuchte} 4		6	5	8	10
Gesamtartenzahl		42	31	30	42

Tab 9.4-5: Mäßig Wärme bis Wärmezeiger, Zeigerwert T = 6 (Ellenberg 2000)

Ellenberg'sche mäßig Wärme bis Wärmezeiger (T = 6)		prozentualer Deckungsgrad in der Parzelle der Fläche				Zeigerwerte nach Ellenberg (2000) für	
Schicht	Art	Senke	Hang	Oberhang	Kuppe	Temperatur	Feuchte
Obere Baumschicht	Tilia platyphyllos	20		0,2	10	6	6
Untere Baumschicht	Acer platanoides					6	k.A.
	Tilia platyphyllos				2	6	6
Strauchschicht1	Acer platanoides	1				6	
	Tilia platyphyllos	3		0,2	0,2	6	6
	Acer platanoides	1	0,2	2	0,01	6	
	Carpinus betulus	0,01				6	
	Quercus petraea			0,01	0,01	6	5
	Tilia platyphyllos	1	0,01	2	0,01	6	6
Krautschicht & Moosschicht	Alliaria petiolata	0,01	0,01		0,2	6	5
	Veronica hederifolia	0,2	0,01			6	5
	Hepatica nobilis		0,01	0,2	1	6	4
	Lathyrus vernus	0,01		0,01	0,2	6	5
	Elymus caninus				0,01	6	6
	Galium aparine	1	0,01		1	6	
	Anemone ranunculoides	35	25	10	45	6	6
	Stellaria holostea	0,2			0,01	6	5
Keimschicht	Quercus spec.	0,01				6	5
	Tilia cordata		0,01		0,01	5	5
	Tilia platyphyllos			0,2		6	6
	Acer campestre				0,01	6	5
Deckungsgrad Arten T = 6		62,4	25,3	14,8	59,7		
Deckungsgrad Arten Feuchte (F= 6)		26,0	0,2	4,6	12,2		
Deckungsgrad Arten (F = 5 oder 4)		3,4	0,2	2,4	67,0		
Deckungsgrad (alle Arten und Schichten)		285,1	289,1	217,3	313,5		
Anzahl der Ellenberg'schen Mäßigwärme - bis Wärmezeiger (T=6)		10	8	6	12		

Tab.9.4-6: Ergebnisse der rasterbezogenen lichtökologischen Untersuchungen im belaubten Sommerhalbjahr

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
1	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,0	12	215,89	10,63	11,47	8,47	11,08	6,71
10	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,2	13	236,38	5,22	8,25	12,07	8,75	7,35
11	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	1	171,15	3,86	5,4	10,95	6,13	6,48
12	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,8	8	273,74	3,83	7,11	11,3	7,66	6,14
13	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,3	1	201,88	7,49	6,96	11,21	7,51	6,46
14	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	1	186,61	5,03	6,88	12,53	7,62	7,16
15	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,4	8	159,12	3,07	11,28	13,84	11,62	8,45
16	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,1	7	95,19	1,27	11,65	10,54	11,5	6,95
17	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,3	11	93,41	3,49	10,52	11,44	10,64	6,68
20	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	13	268,79	7,74	10,24	13,46	10,66	8,35
21	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,1	7	229,09	6,79	11,17	12,23	11,31	6,97
22	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	7	186,78	4,30	10,44	13,85	10,89	8,13
23	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	62,0	7	121,67	5,34	10,5	13,15	10,85	7,55
24	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,2	6	81,76	7,41	8,72	13,48	9,34	7,05
25	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,2	7	49,00	8,65	6,68	15,44	7,82	8,02
30	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,0	7	280,43	11,36	15,53	13,52	15,27	9,61
31	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	8	275,09	7,15	11,72	12,16	11,78	8,25
32	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	62,6	1	31,45	0,86	11,32	16,68	12,02	9,65
33	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	12	61,15	9,38	11,8	13,96	12,08	9
34	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	12	70,75	9,52	5,69	12,61	6,59	6,08
35		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,2	7	61,69	10,63	12,38	13,3	12,5	7,54
40	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,3	10	298,68	12,90	10,72	13,96	11,14	9,23
41	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,0	8	329,56	12,18	10,31	12,97	10,66	8,72
42	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,6	7	13,13	9,62	9,88	13,27	10,33	7,73
43	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,9	1	36,51	7,16	8,87	13,23	9,44	7,19

Fortsetzung **Tabelle 9.4-6**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
44	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	6	55,97	8,87	7,87	12,54	8,48	7,08
45		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,6	9	71,41	17,97	8,33	12,46	8,87	7,23
46		Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	55,4	11	65,83	16,16	12,14	13,12	12,27	8,23
47	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,6	8	68,56	5,43	13,22	13,46	13,25	10,12
50	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,9	7	327,64	16,43	3,25	12,42	4,45	5,98
51		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,0	9	330,61	13,27	10,19	14,98	10,82	10,09
52	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,8	9	349,56	10,97	8,57	14,6	9,35	8,16
53	Hang	Melica-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	8	8,86	6,80	11,69	10,97	11,59	7,4
54	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,0	7	64,85	11,02	12,55	13,49	12,67	7,54
55		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,2	9	58,51	20,54	11,36	13,83	11,68	7,48
56	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	54,4	9	46,06	5,46	8,76	14,05	9,45	8,6
57	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,2	10	24,89	2,41	10,11	11,03	10,23	7,74
58	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,3	11	273,37	3,17	11,34	12,49	11,49	8,57
59	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	54,6	11	307,14	0,89	11,12	10,58	11,05	8,53
60	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,4	9	306,03	15,95	8,59	12,17	9,06	7,39
61	Hang	Melica-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,0	11	323,21	10,59	15,45	9,58	14,68	7,02
62	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,1	8	332,15	13,42	21,7	11,61	20,39	6,87
63	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,9	1	349,34	15,85	19,17	11,53	18,18	7,92
64		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	58,2	6	354,67	14,04	9,71	11,22	9,9	6,62
65		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,7	3	46,73	20,27	9,95	12,38	10,27	6,28
66		Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	54,5	10	54,01	16,17	12,19	13,09	12,3	6,72
67	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,9	11	17,86	5,45	18,17	11,97	17,36	7,82
68	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	53,8	10	315,58	2,01	12,93	12,86	12,92	8,34
69	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	54,0	11	357,03	3,17	9,19	11,75	9,52	7,94
70	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,8	1	321,38	17,90	15,26	10,99	14,7	7,84
71	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	54,3	10	334,65	13,05	14,39	13,57	14,28	9,15

Fortsetzung **Tabelle 9.4-6**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
72	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,2	7	351,10	10,57	16,44	18,48	16,71	10,73
73	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,7	10	2,38	14,49	15,55	12,45	15,15	7,77
74		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,1	14	32,74	13,35	8,43	8,06	8,38	6,19
75		Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,9	1	32,76	13,18	18,91	10,78	17,85	7,18
76	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,4	11	24,94	4,39	20,55	12,14	19,45	6,6
77	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	53,2	11	356,87	3,27	15,79	13,13	15,45	7,55
78	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,4	10	304,86	2,53	15,97	11,96	15,45	8,2
79	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,7	10	323,20	3,76	12,28	9,91	11,97	8,09
80	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	54,0	8	312,67	4,23	7,12	12,03	7,76	8,01
81	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	49,1	13	314,55	10,26	18,05	14,34	17,57	9,35
82	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	50,9	12	319,33	16,91	9,91	11,89	10,17	7,97
83	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	50,8	10	306,54	12,80	10,34	11,38	10,48	7,53
84	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,3	10	319,87	11,65	12,41	10,66	12,18	6,03
85	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,3	11	335,19	9,14	19,31	14,63	18,7	7,93
86	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,6	10	12,81	5,67	20,99	12,54	19,88	7,45
87	Hang	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,2	10	32,70	6,06	12,18	10,04	11,9	7,03
88	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,8	9	32,32	6,43	11,58	12,27	11,67	7,55
89	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,8	9	68,95	7,00	9,29	10,26	9,42	6,51
90	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,7	10	297,06	2,23	17,1	13,23	16,6	8,11
91	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,0	10	325,61	2,58	17,17	10,62	16,31	6,76
92	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	53,2	11	333,81	1,98	17,02	9,48	16,04	8,14
93	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	53,5	11	330,19	3,40	11,63	11,11	11,56	7,6
94	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	53,1	10	310,20	2,90	12,85	8,76	12,32	7,49
95	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	52,7	5	341,02	7,10	16,21	12	15,66	9,38
96	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,2	9	344,98	6,96	15,16	11,53	14,69	7,58
97	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	52,1	9	3,11	3,42	12,91	11,66	12,75	6,37

Fortsetzung **Tabelle 9.4-6**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
98	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	52,1	11	150,73	3,32	11,41	12,14	11,51	6,47
99	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,4	9	163,59	4,73	13	11,09	12,75	6,23
100	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,8	1	51,46	2,61	9,13	12,16	9,52	7,42
101	Hang	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,9	9	38,84	1,04	5,7	9,93	6,25	6,59
102	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,9	6	233,27	2,32	12	11,98	12	5,63
103	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	51,9	11	270,68	7,84	9,32	10,24	9,44	6
104	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	50,3	13	274,30	8,72	3,25	11,35	4,31	6,22
105	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-Buche	48,8	11	264,14	8,08	6,38	14,54	7,45	9,22
106	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-Buche	47,1	13	233,29	12,98	10,24	13,72	10,69	8,44
107	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	51,0	9	249,83	7,88	7,48	9,45	7,74	6,5
108	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	52,4	1	270,42	7,72	5,85	11,2	6,55	6,27
109	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,0	10	251,81	2,13	15,25	15,07	15,23	8,23
110	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,2	9	216,38	1,69	9,57	11,29	9,79	6,16
111	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	54,4	10	306,25	2,80	5,91	13,75	6,94	9,57
112	Hang	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,1	12	277,45	5,62	8,33	10,03	8,55	6,78
113	Hang	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	51,5	1	305,48	8,03	7,88	9,96	8,15	5,61
114	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	49,8	16	248,74	8,84	5,38	12,97	6,37	5,95
115	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	48,5	7	255,54	6,31	9,4	11,97	9,74	7,16

Tab.9.4-7: Ergebnisse der rasterbezogenen lichtökologischen Untersuchungen im Strahlungsfrühjahr

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
1	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,0	12	215,89	10,63	49,93	54,77	50,56	33,56
10	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,2	13	236,38	5,22	41,01	52,35	42,49	29,28
11	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	1	171,15	3,86	34,76	52,59	37,09	28,83
12	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,8	8	273,74	3,83	48,28	52,72	48,86	29,28
13	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,3	1	201,88	7,49	41,10	49,67	42,22	27,32
14	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	1	186,61	5,03	38,51	52,25	40,30	28,33
15	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,4	8	159,12	3,07	53,43	53,84	53,49	29,66
16	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,1	7	95,19	1,27	50,15	48,27	49,90	27,39
17	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,3	11	93,41	3,49	48,26	51,18	48,64	27,96
20	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	13	268,79	7,74	54,65	55,81	54,80	32,79
21	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,1	7	229,09	6,79	62,82	53,44	61,60	30,51
22	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	7	186,78	4,30	58,90	54,74	58,36	30,57
23	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	62,0	7	121,67	5,34	57,39	51,90	56,67	28,88
24	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,2	6	81,76	7,41	53,50	53,70	53,52	28,34
25	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,2	7	49,00	8,65	54,60	52,68	54,35	27,85
30	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,0	7	280,43	11,36	62,48	55,68	61,59	34,93
31	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	8	275,09	7,15	61,23	55,47	60,48	33,79
32	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	62,6	1	31,45	0,86	60,21	55,76	59,63	33,21
33	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,9	12	61,15	9,38	51,83	54,14	52,13	32,73
34	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,7	12	70,75	9,52	47,99	54,96	48,90	30,43
35		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,2	7	61,69	10,63	45,06	51,32	45,88	29,39
40	Kuppe	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,3	10	298,68	12,90	47,10	57,36	48,44	34,56
41	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,0	8	329,56	12,18	57,31	60,64	57,74	38,48
42	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	61,6	7	13,13	9,62	54,70	60,84	55,50	37,02
43	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	60,9	1	36,51	7,16	51,98	59,76	53,00	34,91

Fortsetzung **Tabelle 9.4-7**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
44	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	6	55,97	8,87	54,58	61,09	55,43	35,42
45		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,6	9	71,41	17,97	54,44	56,19	54,67	32,04
46		Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	55,4	11	65,83	16,16	53,88	53,83	53,87	30,46
47	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,6	8	68,56	5,43	59,46	53,69	58,70	30,80
50	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,9	7	327,64	16,43	48,14	56,57	49,24	32,08
51		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,0	9	330,61	13,27	38,33	59,10	41,04	35,11
52	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,8	9	349,56	10,97	47,69	60,27	49,33	33,79
53	Hang	Melica-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,9	8	8,86	6,80	52,01	54,25	52,31	32,61
54	Kuppe	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	59,0	7	64,85	11,02	48,82	59,81	50,25	34,54
55		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,2	9	58,51	20,54	43,65	56,97	45,39	31,90
56	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	54,4	9	46,06	5,46	50,19	56,49	51,01	32,46
57	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,2	10	24,89	2,41	55,85	55,77	55,84	33,14
58	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	54,3	11	273,37	3,17	59,81	59,48	59,76	34,62
59	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	54,6	11	307,14	0,89	54,10	54,96	54,22	32,80
60	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,4	9	306,03	15,95	51,42	57,77	52,24	32,34
61	Hang	Melica-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,0	11	323,21	10,59	47,57	53,19	48,30	30,55
62	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,1	8	332,15	13,42	45,14	54,93	46,41	30,51
63	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	57,9	1	349,34	15,85	41,49	55,24	43,28	32,52
64		Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	58,2	6	354,67	14,04	55,71	58,21	56,04	32,84
65		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	56,7	3	46,73	20,27	53,36	58,83	54,07	32,10
66		Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	54,5	10	54,01	16,17	51,47	56,59	52,14	30,48
67	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,9	11	17,86	5,45	56,81	53,45	56,37	30,04
68	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	53,8	10	315,58	2,01	57,25	57,75	57,32	33,05
69	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	54,0	11	357,03	3,17	55,39	51,89	54,93	29,51
70	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,8	1	321,38	17,90	55,65	58,53	56,03	34,46
71	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	54,3	10	334,65	13,05	56,26	57,58	56,43	33,53

Fortsetzung **Tabelle 9.4-7**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
72	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,2	7	351,10	10,57	54,17	58,74	54,77	33,27
73	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,7	10	2,38	14,49	57,96	58,83	58,07	33,42
74		Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	55,1	14	32,74	13,35	56,12	56,60	56,18	33,40
75		Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,9	1	32,76	13,18	54,38	57,65	54,81	32,24
76	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,4	11	24,94	4,39	51,05	54,34	51,48	29,93
77	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	53,2	11	356,87	3,27	48,12	57,09	49,29	31,19
78	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,4	10	304,86	2,53	55,53	58,15	55,87	33,52
79	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,7	10	323,20	3,76	55,74	57,22	55,94	34,26
80	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	54,0	8	312,67	4,23	55,84	58,91	56,24	33,99
81	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	49,1	13	314,55	10,26	58,20	57,71	58,13	33,20
82	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	50,9	12	319,33	16,91	52,74	58,00	53,42	34,21
83	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	50,8	10	306,54	12,80	54,40	57,80	54,84	32,99
84	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,3	10	319,87	11,65	55,68	51,62	55,15	28,90
85	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,3	11	335,19	9,14	54,34	58,69	54,90	32,01
86	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,6	10	12,81	5,67	53,85	56,39	54,18	30,93
87	Hang	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,2	10	32,70	6,06	51,17	54,39	51,59	30,84
88	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,8	9	32,32	6,43	44,96	54,79	46,25	30,39
89	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,8	9	68,95	7,00	48,15	54,52	48,98	29,58
90	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,7	10	297,06	2,23	53,20	56,01	53,57	30,32
91	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,0	10	325,61	2,58	58,93	53,79	58,26	30,16
92	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	53,2	11	333,81	1,98	58,06	56,34	57,84	33,29
93	Senke	Melica -Lamium	Esche-Buche	53,5	11	330,19	3,40	52,74	58,97	53,55	34,35
94	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	53,1	10	310,20	2,90	55,72	54,11	55,51	31,39
95	Senke	Melica-Lamium	Esche-Buche	52,7	5	341,02	7,10	58,15	55,61	57,82	32,66
96	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,2	9	344,98	6,96	59,64	55,80	59,14	31,81
97	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	52,1	9	3,11	3,42	58,60	55,17	58,15	30,40

Fortsetzung **Tabelle 9.4-7**

Punkt	Fläche	Artengruppen- kombination	Waldökosystem	Z (m)	Höhen- klasse	Exposition (Grad)	Neigung (Grad)	DIRSF (%)	DIFFSF (%)	TOTSF (%)	Openness
98	Senke	ohne Vegetation	Esche-Buche	52,1	11	150,73	3,32	51,81	54,70	52,19	29,98
99	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,4	9	163,59	4,73	55,82	51,38	55,24	28,07
100	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,8	1	51,46	2,61	46,06	56,40	47,41	31,17
101	Hang	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	52,9	9	38,84	1,04	39,39	55,01	41,43	30,59
102	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	52,9	6	233,27	2,32	49,56	56,58	50,48	30,24
103	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	51,9	11	270,68	7,84	45,30	54,31	46,48	29,82
104	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	50,3	13	274,30	8,72	50,90	57,14	51,71	32,77
105	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-Buche	48,8	11	264,14	8,08	52,73	57,72	53,38	34,07
106	Hang	Aegopodium-Lamium	Bingelkraut-Buche	47,1	13	233,29	12,98	57,64	53,62	57,12	31,57
107	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	51,0	9	249,83	7,88	48,82	54,22	49,53	30,90
108	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	52,4	1	270,42	7,72	41,89	52,73	43,31	28,42
109	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-WLI-RBU	53,0	10	251,81	2,13	48,33	53,49	49,00	28,97
110	Senke	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	53,2	9	216,38	1,69	56,34	57,68	56,51	30,78
111	Senke	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	54,4	10	306,25	2,80	53,89	54,91	54,02	32,73
112	Hang	Aegopodium-Lamium	Esche-Buche	52,1	12	277,45	5,62	54,03	53,25	53,93	28,68
113	Hang	Mercurialis-Lamium	Esche-Buche	51,5	1	305,48	8,03	51,08	50,99	51,06	26,94
114	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	49,8	16	248,74	8,84	43,93	53,84	45,22	28,30
115	Hang	Mercurialis-Lamium	Bingelkraut-Buche	48,5	7	255,54	6,31	53,27	56,54	53,70	30,18

Tab.9.4-8: Übersicht über die Ergebnisse an 10 Mikrosatellitenorten der Buche

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
29	191	Kuppe	325	341	108	140	165	167	199	199	110	118	225	234	111	123	132	148	307	307	97	99
20	1021	Kuppe	329	341	122	122	177	177	199	199	110	112	219	234	111	111	136	148	289	293	97	109
25	862	Kuppe	325	341	104	104	167	169	199	202	110	114	234	234	111	111	132	148	293	317	97	109
26	1143	Kuppe	327	327	114	122	167	177	199	199	114	124	225	225	111	129	134	134	311	311	105	109
55	399	Kuppe	325	325	112	112	161	177	199	199	112	112	225	234	111	127	132	132	307	313	97	103
61	22	Kuppe	329	329	114	122	169	177	199	199	110	114	225	234	111	111	136	136	289	293	97	97
62	42	Kuppe	327	329	122	122	177	177	199	202	110	112	225	234	111	125	134	136	307	319	97	109
64	32	Kuppe	325	327	114	122	161	169	199	202	108	118	225	237	111	111	132	134	293	321	97	103
65	36	Kuppe	329	341	122	122	177	177	199	199	110	112	219	225	111	111	136	148	293	293	97	97
66	23	Kuppe	329	329	120	122	177	177	199	199	112	114	219	225	111	111	132	136	293	317	97	107
68	67	Kuppe	329	329	120	122	163	177	199	199	112	124	219	225	111	111	136	136	289	327	97	109
126	38	Kuppe	325	333	120	120	161	177	199	199	114	128	225	228	111	111	132	140	293	301	97	109
127	51	Kuppe	325	351	112	122	163	171	199	199	110	124	234	234	111	117	132	158	289	289	97	107
128	35	Kuppe	327	329	120	120	167	171	199	205	118	124	225	234	111	111	134	136	295	307	97	97
124	24	Kuppe	325	327	104	104	169	171	199	202	112	114	225	234	111	125	132	134	293	319	101	109
125	27	Kuppe	327	327	120	122	169	177	199	199	108	128	219	234	111	117	132	134	307	317	97	109
121	46	Kuppe	327	341	122	122	167	177	199	199	112	124	219	234	111	111	134	148	289	303	97	105
122	26	Kuppe	325	325	112	114	167	177	199	202	124	124	225	234	113	125	132	132	307	313	97	101
123	29	Kuppe	325	335	120	122	161	161	199	202	118	118	219	225	117	117	132	142	317	317	97	103
110	13	Kuppe	325	325	120	124	167	177	199	202	108	124	225	234	111	117	132	132	289	293	97	109
90	58	Kuppe	327	331	114	114	167	177	199	199	114	118	225	234	111	129	134	138	319	321	97	109
91	23	Kuppe	325	327	112	112	167	171	199	202	118	124	219	225	111	117	132	134	319	319	101	103
202	125	Kuppe	325	335	112	112	167	177	199	199	124	124	225	234	111	127	132	142	311	313	97	103
221	18	Kuppe	329	335	112	116	167	171	199	199	110	116	219	234	111	129	136	142	309	321	97	101
223	33	Kuppe	325	329	114	114	177	177	199	205	116	124	219	234	117	127	132	136	303	311	97	97
224	20	Kuppe	329	335	120	120	167	175	199	199	114	124	225	234	121	127	136	142	285	313	97	101
228	33	Kuppe	325	335	116	120	165	167	199	199	110	124	225	234	111	111	132	142	305	309	103	107
229	35	Kuppe	335	341	116	120	171	175	199	199	116	124	219	234	111	127	142	148	285	321	97	97

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n neu A1		sfc0036_gr A1	
231	25	Kuppe	327	335	114	114	171	177	199	199	124	124	234	234	111	127	134	142	311	313	97	109
232	20	Kuppe	327	327	120	120	171	171	199	205	118	124	225	228	111	127	134	134	307	319	97	101
234	18	Kuppe	329	335	112	116	163	177	199	199	108	116	225	234	111	111	136	142	283	309	97	101
244	25	Kuppe	341	341	112	116	171	177	199	199	108	128	234	234	111	129	148	148	307	321	97	97
245	8	Kuppe	329	333	116	116	171	171	199	199	112	116	225	234	111	111	136	140	321	321	97	97
247	26	Kuppe	327	327	98	98	161	171	199	199	114	118	219	234	117	117	134	134	305	311	101	109
250	21	Kuppe	327	335	112	120	167	177	199	202	108	118	219	234	111	127	134	142	303	307	101	109
264	39	Kuppe	327	335	98	98	167	171	199	205	118	118	234	234	117	127	134	142	313	319	97	97
278	111	Kuppe	327	329	104	104	171	177	199	205	118	118	234	234	111	117	134	136	293	319	101	107
315	40	Kuppe	327	331	114	122	167	177	199	202	124	126	225	237	111	111	134	138	305	311	103	105
318	34	Kuppe	327	329	114	114	167	171	199	199	114	128	225	234	117	117	134	136	293	293	97	97
306	94	Kuppe	327	341	120	120	159	167	202	205	108	118	219	225	111	117	134	148	307	317	97	109
307	58	Kuppe	335	341	114	122	177	177	199	199	108	112	219	225	111	111	142	148	289	307	107	109
201	15	Kuppe	329	329	112	116	163	167	199	202	114	124	225	234	111	117	136	136	307	327	97	97
184	99	Hang	329	335	114	116	171	177	199	199	112	118	219	219	111	127	136	142	307	317	97	109
189	88	Hang	325	327	112	114	171	177	199	202	110	114	225	228	111	111	132	134	289	321	97	105
190	154	Hang	327	327	112	122	167	177	199	199	110	124	225	234	111	117	132	134	307	311	97	105
81	188	Hang	333	333	114	140	161	163	199	199	112	124	225	225	111	111	140	140	307	311	97	97
193	156	Hang	327	329	114	120	177	179	199	199	118	124	219	234	111	111	134	136	289	307	97	109
192	35	Hang	331	335	112	122	177	177	199	199	112	118	219	234	111	127	138	142	309	317	97	103
277	216	Hang	325	333	112	112	169	177	199	199	108	114	234	234	111	111	132	140	289	325	97	107
90	150	Hang	327	329	114	122	167	167	199	205	118	124	225	234	111	131	136	138	293	319	105	109
91	101	Hang	327	327	120	142	159	171	199	202	108	108	234	234	111	111	134	134	309	309	101	107
92	126	Hang	327	333	112	122	167	171	199	199	118	124	225	234	111	127	134	140	303	305	101	109
93	99	Hang	327	327	120	120	167	177	199	199	106	128	234	234	111	127	132	134	289	319	97	109
302	900	Hang	327	329	120	120	167	179	199	199	108	118	219	234	127	127	134	136	303	311	97	97
201	52	Hang	327	327	112	120	171	179	193	199	118	124	222	234	111	127	134	134	313	321	97	105
108	230	Hang	327	327	120	120	171	171	199	199	112	128	219	234	111	111	134	134	289	307	97	99
202	47	Hang	325	325	112	120	161	161	199	199	124	128	234	234	111	111	132	132	289	305	97	101

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n neu A1		sfc0036_gr A1	
222	37	Hang	325	335	112	112	163	167	199	199	108	112	228	234	111	111	132	142	325	325	105	109
203	88	Hang	325	329	112	120	163	171	199	202	124	128	219	234	111	117	132	136	289	325	97	105
204	92	Hang	325	329	112	112	163	167	199	199	124	128	219	234	111	117	132	136	311	327	105	109
205	65	Hang	325	327	112	112	161	163	199	199	108	108	219	234	111	117	132	134	325	325	97	105
21	1043	Hang	325	325	116	122	161	167	199	199	118	126	219	219	111	117	132	132	303	303	97	99
208	165	Hang	325	325	112	116	161	179	199	199	108	118	228	231	117	127	132	132	305	325	97	105
209	111	Hang	325	327	114	120	161	163	199	199	114	118	219	219	111	111	132	134	289	311	97	105
210	153	Hang	327	327	120	120	167	177	199	199	108	118	234	234	111	127	134	134	289	319	109	109
100	170	Hang	327	329	114	114	161	163	199	199	110	114	219	219	111	111	134	136	289	319	97	105
219	125	Hang	329	329	112	112	163	167	199	199	118	118	234	234	111	111	136	136	307	319	101	109
331	48	Hang	325	327	112	120	171	179	199	199	114	130	219	234	111	111	132	134	305	321	97	109
18	159	Hang	327	329	122	122	167	179	199	199	106	128	234	234	111	111	134	136	319	321	105	109
214	83	Hang	325	325	112	120	161	165	199	199	114	124	219	225	111	117	132	132	289	317	99	105
215	226	Hang	327	329	110	120	161	167	199	199	118	126	219	234	111	127	134	136	313	319	97	103
216	88	Hang	327	329	112	114	161	177	199	199	118	118	219	228	111	127	134	136	289	301	97	99
217	94	Hang	325	329	120	120	161	161	199	199	108	114	219	225	111	111	132	136	313	321	101	105
218	111	Hang	327	329	120	122	163	177	199	199	110	112	225	234	111	119	134	136	307	307	97	103
220	82	Hang	327	327	114	122	161	167	199	199	110	118	225	234	111	125	134	134	295	305	97	97
223	72	Hang	325	325	112	118	161	171	199	199	106	128	228	234	117	127	132	132	325	327	97	97
226	49	Hang	325	327	112	122	161	167	199	205	114	118	219	225	111	111	132	134	289	303	99	107
227	51	Hang	325	335	114	124	161	179	199	199	112	114	219	234	111	111	132	142	289	289	103	105
228	36	Hang	329	337	114	120	161	161	199	199	108	114	219	234	111	127	136	144	289	289	97	105
229	33	Hang	327	329	120	120	161	163	199	199	108	114	219	222	111	111	134	136	289	319	97	97
230	37	Hang	325	325	112	112	161	171	199	199	108	128	219	234	111	117	132	132	327	327	97	97
233	31	Hang	325	329	120	122	161	163	199	199	118	122	219	234	111	127	132	136	307	313	97	103
234	38	Hang	329	329	116	120	161	165	199	199	118	118	219	231	111	111	136	136	311	313	97	103
235	60	Hang	329	329	116	122	163	167	199	199	106	118	228	231	111	111	136	136	311	319	97	109
64	163	Hang	325	325	112	120	161	167	199	199	118	118	219	219	111	111	132	132	307	313	97	105
236	44	Hang	325	329	120	120	167	177	199	199	106	118	225	228	111	111	132	136	307	319	107	109

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
238	101	Hang	325	327	120	120	159	163	193	199	118	128	234	237	111	111	132	134	305	313	103	109
239	69	Hang	327	327	122	122	167	171	199	202	112	118	225	234	111	111	134	134	303	317	97	109
275	128	Hang	325	335	112	122	161	177	199	199	118	118	234	237	111	111	132	142	301	307	97	103
276	135	Hang	325	329	120	120	163	167	199	199	118	128	234	234	111	111	132	136	301	307	103	103
68	212	Hang	325	331	112	114	163	177	199	202	118	124	219	225	111	127	132	138	311	315	97	103
274	60	Hang	327	327	98	122	161	161	199	202	116	118	219	225	111	125	136	136	307	317	97	107
280	79	Hang	335	335	112	114	167	169	202	205	118	126	225	234	111	117	142	142	307	319	103	109
281	34	Hang	327	333	112	120	167	171	199	199	106	124	234	234	111	127	134	140	307	317	99	101
282	40	Hang	327	327	112	120	171	171	199	199	110	126	219	225	111	111	134	134	307	313	97	101
278	47	Hang	327	327	112	120	161	171	199	199	108	128	222	234	111	117	134	134	313	321	97	101
283	54	Hang	327	335	112	122	161	161	199	199	106	128	219	225	111	111	134	142	303	313	97	97
303	950	Hang	325	327	112	112	163	169	199	199	108	114	219	234	111	127	132	134	289	327	97	99
86	122	Hang	327	333	122	122	159	167	199	199	106	118	228	234	111	127	134	140	301	303	107	109
240	78	Hang	325	329	120	120	161	167	199	199	106	124	219	228	111	111	132	136	303	311	109	109
84	275	Hang	325	327	112	122	163	167	199	199	106	128	228	228	111	117	134	136	327	327	97	109
87	159	Hang	327	331	112	116	161	167	199	199	118	124	219	219	111	131	136	138	319	319	97	97
242	67	Hang	327	333	122	124	159	165	199	202	108	124	234	234	111	111	134	140	289	289	97	109
243	45	Hang	327	335	112	122	167	167	199	199	114	118	234	234	111	111	136	142	303	313	107	109
78	206	Hang	325	325	114	124	161	171	199	202	112	124	225	234	117	127	132	132	305	319	107	109
277	216	Hang	325	333	112	112	169	177	199	199	108	114	234	234	111	111	132	140	289	325	97	107
247	35	Hang	327	335	120	122	159	163	199	199	118	118	234	237	111	111	134	142	305	307	97	97
301	49	Hang	327	333	122	122	171	179	202	205	108	118	225	231	111	129	136	140	287	289	97	103
267	82	Hang	329	333	112	114	161	177	199	199	114	118	219	234	111	127	136	140	289	307	103	105
98	527	Hang	327	341	120	122	167	177	199	199	108	124	234	234	111	127	134	148	305	307	97	97
103	703	Hang	327	327	112	114	167	171	199	199	124	126	225	234	111	117	134	134	289	319	97	105
19	205	Hang	333	337	112	120	165	177	199	199	108	116	234	234	111	129	140	144	305	321	97	97
96	777	Hang	327	327	120	120	167	171	199	205	118	118	219	234	111	127	134	134	307	307	97	99
105	325	Hang	327	327	112	120	171	177	199	199	112	128	225	234	111	111	134	134	305	305	97	103

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
109	145	Hang	327	333	112	114	165	169	199	199	116	118	228	234	111	127	134	140	303	305	97	97
235	334	Senke	327	329	112	112	167	169	199	202	112	118	234	234	111	129	134	136	305	307	97	107
236	141	Senke	327	327	112	114	161	169	199	199	112	118	219	219	111	117	132	134	307	307	97	103
234	129	Senke	327	327	112	120	167	167	199	202	108	114	225	234	111	129	134	136	305	311	105	107
233	75	Senke	325	327	112	120	167	167	199	199	112	114	219	234	111	127	132	134	307	309	105	109
230	39	Senke	327	329	120	122	167	167	199	199	110	112	234	234	111	129	134	136	307	307	101	105
229	42	Senke	329	329	116	120	163	167	199	199	112	118	219	234	111	117	136	136	309	327	103	105
227	40	Senke	325	327	112	112	161	171	199	199	114	124	234	234	111	127	132	134	305	305	97	105
226	137	Senke	335	337	114	122	161	177	199	202	112	118	234	234	111	127	142	144	311	311	97	109
225	248	Senke	335	339	120	122	161	177	199	199	114	124	225	234	111	129	142	146	285	319	101	109
223	166	Senke	327	339	122	122	161	167	199	199	118	124	225	234	111	111	134	146	311	319	101	109
222	223	Senke	333	339	120	122	163	165	199	199	106	114	234	234	111	117	140	146	319	333	97	101
221	281	Senke	325	337	122	122	161	167	199	199	108	118	225	234	111	127	132	144	319	319	101	105
220	94	Senke	325	337	116	116	161	171	199	202	110	118	228	234	111	111	132	144	289	289	97	101
105	377	Senke	335	337	116	120	163	167	199	199	118	118	219	225	111	127	142	144	313	319	101	109
104	108	Senke	335	337	116	120	161	177	199	199	108	114	234	234	111	127	142	144	303	305	97	109
102	71	Senke	325	337	112	116	161	171	199	199	116	118	234	234	111	111	132	144	319	319	97	101
107	107	Senke	327	339	112	122	161	161	199	202	114	114	219	234	111	111	134	146	317	317	101	101
219	134	Senke	327	337	120	122	167	169	199	202	110	112	234	234	117	129	134	144	309	317	97	105
216	54	Senke	335	339	116	122	161	169	199	199	118	128	234	234	111	117	142	146	305	305	97	109
215	42	Senke	327	327	116	116	163	165	199	199	116	118	234	234	111	117	134	134	307	311	103	109
211	52	Senke	327	327	120	120	161	167	199	199	116	118	219	234	117	117	134	134	311	313	97	109
210	149	Senke	327	339	116	120	161	171	199	199	114	118	225	234	111	111	134	146	289	319	97	109
209	74	Senke	325	335	112	120	163	177	199	199	112	124	225	234	111	111	132	142	307	321	97	99

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenoorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
211	52	Senke	327	327	120	120	161	167	199	199	116	118	219	234	117	117	134	134	311	313	97	109
204	59	Senke	327	337	120	122	163	169	199	199	118	118	219	234	111	131	134	144	311	319	101	109
205	60	Senke	329	337	116	122	163	165	199	199	116	118	219	234	117	117	136	144	307	321	103	109
179	91	Senke	327	337	120	120	167	171	199	202	114	118	225	234	111	117	134	144	313	319	97	109
180	37	Senke	327	337	120	122	165	169	199	199	118	124	231	234	111	117	134	144	313	313	107	109
201	191	Senke	327	327	112	120	161	169	199	199	112	114	219	234	111	127	134	134	307	319	97	97
181	177	Senke	327	339	116	122	163	167	199	199	114	122	234	234	111	127	134	146	307	319	99	109
182	33	Senke	325	327	112	116	165	169	199	199	106	116	234	234	111	119	132	134	303	313	97	97
184	35	Senke	327	329	120	122	161	167	199	199	112	124	219	225	127	127	134	136	301	319	97	103
185	20	Senke	327	329	120	122	161	167	199	199	112	124	219	225	127	127	134	136	301	319	97	103
35	532	Senke	329	329	112	122	161	177	199	199	106	112	219	225	111	127	136	136	313	319	97	103
43	257	Senke	327	333	108	116	165	167	199	199	118	118	225	234	111	111	134	140	303	313	97	109
189	58	Senke	327	335	112	122	161	171	199	199	112	126	234	234	127	127	134	142	307	309	97	105
41	1020	Senke	327	337	112	116	167	171	199	205	118	118	219	234	111	123	134	144	313	315	101	101
187	44	Senke	327	333	112	122	161	165	199	202	106	124	219	234	111	129	134	140	313	319	97	101
188	28	Senke	325	329	112	114	167	179	199	199	106	110	225	234	111	127	132	136	305	319	105	109
249	85	Senke	327	333	120	122	167	167	199	199	112	124	219	234	111	127	134	140	309	313	97	103
197	91	Senke	327	337	112	114	167	167	199	205	112	118	219	237	123	127	134	144	315	321	101	107
198	48	Senke	325	325	120	122	161	167	199	202	110	124	225	234	125	127	134	134	305	313	101	109
199	69	Senke	337	337	120	120	163	171	199	199	110	118	219	234	111	117	144	144	305	327	97	103
200	178	Senke	327	337	112	120	163	167	199	199	118	126	219	234	117	117	134	144	327	327	97	103
42	411	Senke	327	337	98	98	161	171	199	199	118	124	234	234	111	117	134	144	307	327	103	109
191	172	Senke	327	329	112	112	167	169	199	199	108	124	225	225	129	129	134	136	307	313	97	107
193	50	Senke	327	337	112	116	161	167	199	199	114	124	219	234	111	127	134	144	319	319	101	105

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenoorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
195	83	Senke	327	329	112	120	161	163	199	199	112	118	219	219	117	128	134	136	309	321	97	103
194	202	Senke	327	337	110	122	161	169	199	199	116	118	234	234	111	129	134	144	319	319	103	109
40	373	Senke	335	337	120	120	161	181	199	199	118	124	225	234	117	129	142	144	325	327	97	103
93	263	Senke	327	337	112	116	161	167	199	199	112	118	225	234	111	111	134	144	307	319	97	101
94	65	Senke	325	327	112	120	163	171	199	199	110	112	234	234	111	111	132	134	307	307	99	101
95	67	Senke	333	339	122	124	161	169	199	199	114	126	234	234	111	123	140	146	319	319	97	109
98	44	Senke	327	329	112	112	161	167	199	199	118	124	219	219	111	127	134	136	319	319	97	105
33	247	Senke	325	339	112	116	161	171	199	199	114	118	234	234	111	111	132	146	307	307	101	109
66	558	Senke	327	333	112	114	165	167	199	199	118	126	225	228	111	111	134	140	303	309	99	109
67	328	Senke	327	331	112	112	163	177	199	202	112	124	225	228	111	123	136	138	311	313	97	101
65	258	Senke	327	327	116	122	165	171	199	199	116	118	234	234	111	117	136	136	311	319	101	103
49	381	Senke	327	329	120	120	163	163	199	199	118	124	234	234	111	123	134	136	307	311	97	105
74	72	Senke	327	329	120	120	163	165	199	199	118	118	234	234	111	127	134	136	311	311	101	103
73	97	Senke	327	337	112	120	161	167	199	199	106	118	234	234	111	123	134	144	311	317	101	107
51	427	Senke	335	337	116	116	161	167	199	199	118	118	225	234	123	127	142	144	303	307	97	105
72	177	Senke	327	327	112	122	161	167	199	202	114	124	234	234	111	111	134	134	295	307	97	105
58	593	Senke	327	327	112	112	165	175	199	202	118	118	234	234	111	127	134	134	305	307	97	107
52	575	Senke	327	335	112	112	161	161	199	199	114	124	225	234	111	129	136	142	307	319	103	105
71	248	Senke	327	335	104	106	163	167	199	199	124	124	234	234	123	127	134	142	307	307	103	105
153	47	Senke	327	335	112	112	163	167	199	199	106	112	234	234	111	111	134	142	293	307	99	107
154	36	Senke	333	333	120	122	167	169	199	202	118	118	225	225	117	127	140	140	289	319	97	99
144	72	Senke	337	339	116	120	167	167	199	199	112	118	219	228	117	117	144	146	305	319	99	105
77	77	Senke	335	335	114	120	163	165	199	199	110	118	225	234	111	117	142	142	307	307	99	109
80	154	Senke	327	335	114	120	161	163	199	199	110	124	225	234	111	129	134	142	307	313	97	101

Fortsetzung **Tabelle 9.4-8**

Baum	BHD mm	Fläche	Kernmikrosatellitengenorte																			
			mfc11_bla u A1		FS1-15_bl A1		csolf19_s w A1		FS3- 04gruen A1		csolf31_G rün A1		DE576A0 A1		mfc7_sch warz A1		mfs11_bla u A1		mfc5_grü n_neu A1		sfc0036_gr A1	
81	307	Senke	327	327	120	122	167	177	199	199	110	124	225	234	111	111	134	134	307	311	99	105
82	218	Senke	325	327	112	120	167	167	199	199	112	124	225	234	111	117	132	134	315	321	101	101
83	85	Senke	333	339	116	116	169	171	199	199	124	124	228	234	111	125	140	146	319	319	97	99
111	178	Senke	333	335	116	120	167	179	199	202	112	118	234	234	111	129	140	142	289	307	97	99
119	242	Senke	325	333	112	122	169	177	199	199	110	118	219	225	111	127	132	140	289	307	97	97
126	147	Senke	325	341	116	120	169	179	202	202	118	118	225	234	127	127	132	148	289	289	97	97
127	236	Senke	331	333	112	116	163	169	202	202	118	118	225	234	127	127	138	140	289	321	97	103
30	487	Senke	327	327	112	114	161	167	199	199	114	124	225	234	111	127	134	134	307	311	105	107
75	345	Senke	327	339	112	122	165	169	199	199	118	118	225	228	111	111	134	146	307	309	97	99
208	247	Senke	333	339	122	122	161	175	199	199	118	118	225	234	111	111	140	146	307	307	97	109
32	462	Senke	325	327	112	112	167	171	199	199	110	118	228	234	111	127	132	134	309	317	97	101
92	348	Senke	327	335	116	120	161	171	199	199	114	118	225	225	111	111	134	142	323	323	105	107
217	277	Senke	337	337	120	140	161	165	199	199	118	124	234	234	117	127	144	144	305	307	97	97

Tab.9.4-9: Übersicht über die genetischen Untersuchungsergebnisse der Linden an 12 Mikrosatellitenorten

Baum- NR	Kernmikrosatelliten-Genorte																								Morpholo- gisch	genetisch	Klone
	Tc5		Tc31		Tc6		Tc7		Tc4		Tc8		Tc915		Tc963		Tc951		Tc918		Tc920		Tc11				
25	149	187	207	211	129	139	244	278	226	232	158	162	176	176	236	282	157	157	236	236	228	232	144	144	SLI	SLI	56
31	153	153	209	217	129	139	238	238	226	232	154	168	152	176	236	240	157	157	236	236	216	228	146	158	SLI	SLI	62
54/55	141	165	197	197	135	141	230	230	222	226	144	144	164	164	268	284	159	159			222	230	134	134	WLI	WLI	42
61	159	161	199	207	127	141	238	242	232	232	152	160	152	188	230	230	169	171	236	236	228	228	146	146	SLI	SLI	71
62	145	153	199	215	141	143	238	244	226	234	162	164	166	176	236	242	157	157	236	236	228	228	150	150	SLI	SLI	45
101	141	145	195	195	135	139	230	234	228	228	144	144	176	184	276	280	155	159			226	234	132	134	WLI	WLI	22
117	157	163	201	209	125	139	234	244	226	230	156	158	174	192	240	282	157	157	236	236	228	228	144	152	SLI	SLI	68
108	141	141	195	195	135	145	230	230	236	236	144	144	162	164	264	266	159	159			222	222	134	134	WLI	WLI	4
125	141	165	195	197	139	141	230	230	226	228	144	144	160	164	266	274	159	159			220	228	134	134	WLI	WLI	40
139	141	151	195	197	137	137	230	230	222	240	144	144	156	186	264	272	159	159			222	232	132	134	WLI	WLI	31
158	157	161	209	209	129	139	238	268	228	228	152	166	158	160	230	230	151	151	236	236	228	230	150	150	WLI	SLI	67
157	141	151	197	197	135	135	230	230	222	228	144	144	156	164	254	266	159	159			222	234	134	134	WLI	WLI	33
159	149	153	201	207	129	129	238	238	226	228	154	164	150	152	274	282	157	157	234	236	216	228	144	158	SLI	SLI	53
160	145	151	195	195	137	141	218	230	222	222	144	144	162	164	250	264	159	159			222	226	134	134	WLI	WLI	44
162	141	165	195	195	135	135	230	230	222	222	144	144	156	164	266	270	157	159			222	230	132	134	WLI	WLI	38
163	157	185	207	209	141	143	238	242	228	234	154	164	158	192	230	254	157	157	236	236	228	234	146	146	SLI	SLI	70
164	141	141	197	197	135	135	230	234	232	234	144	144	164	180	264	266	157	159			222	228	134	134	WLI	WLI	14
165	141	151	195	195	135	135	230	230	216	222	144	144	156	182	262	264	157	159			222	228	134	134	WLI	WLI	24
167	141	141	197	197	135	141	230	230	236	236	144	144	164	184	278	280	159	159			220	232	134	134	WLI	WLI	15
168	141	151	195	197	135	135	230	230	232	236	144	144	156	164	266	280	155	159			222	232	134	146	WLI	WLI	28
169	177	185	205	209	141	141	240	244	224	228	162	168	158	176	240	282	157	157	236	236	228	228	146	146	SLI	SLI	74
170	157	171	207	207	129	141	238	266	224	230	154	154	166	188	230	242	151	151	236	236	224	228	134	134	SLI	SLI	69
174	153	153	207	215	129	139	238	238	226	230	154	168	152	176	236	240	157	157	236	236	216	228	146	158	SLI	SLI	61
175/176	153	153	207	215	129	139	238	238	224	230	154	154	152	176	236	240	157	157	236	236	216	228	146	158	SLI	SLI	60
177	149	161	209	209	129	141	238	266	224	228	154	162	158	188	240	246	151	151	236	236	230	230	146	158	SLI	SLI	55

Fortsetzung **Tabelle 9.4-9**

Baum- NR	Kernmikrosatelliten-Genorte																							Morpholo- gisch	genetisch	Klone	
	Tc5		Tc31		Tc6		Tc7		Tc4		Tc8		Tc915		Tc963		Tc951		Tc918		Tc920		Tc11				
154/155	141	159	197	197	141	145	218	230	222	222	144	144	166	176	258	264	157	159			232	234	134	134	WLI	WLI	37
164	141	141	203	203	141	143	230	230	222	222	144	144	164	164	266	276	159	159			232	232	134	134	WLI	WLI	21
190	141	141	195	197	141	141	218	230	222	230	144	144	156	164	262	266	157	159			226	228	156	158	WLI	WLI	11
191/192	141	141	195	203	141	141	218	230	222	236	144	144	164	184	266	284	157	159			226	232	134	134	WLI	WLI	13
200	141	151	197	197	135	141	218	218	222	228	144	144	164	164	266	266	157	159			228	232	138	138	WLI	WLI	34
203	141	165	195	203	139	141	218	230	222	228	144	144	156	164	266	276	157	159			226	228	134	134	WLI	WLI	41
204	151	153	199	203	141	141	232	236	230	234	154	160	164	176	230	232	157	157	236	236	228	232	150	150	SLI	SLI	57
215	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	134	134	WLI	WLI	A
217	141	141	203	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			228	232	136	136	WLI	WLI	20
218	141	141	197	203	137	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	138	138	WLI	WLI	19
207	141	141	195	197	135	141	230	230	222	222	144	144	164	182	266	268	157	161			228	234	134	134	WLI	WLI	10
226	141	151	195	195	135	135	230	230	222	236	144	144	180	184	264	266	159	159			220	226	138	138	WLI	WLI	25
227	159	161	205	209	129	137	236	236	214	228	152	172	158	188	240	244	151	151	236	236	228	228	146	146	SLI	SLI	72
228	141	151	197	203	141	145	218	218	222	222	144	144	156	164	264	266	157	159			226	228	138	138	WLI	WLI	36
251	141	165	195	195	135	135	230	230	222	228	144	144	164	164	266	266	155	157			228	232	136	136	WLI	WLI	39
252	141	165	195	195	135	135	230	230	222	228	144	144	164	164	266	266	155	157			228	232	136	136	WLI	WLI	39
270	141	141	195	195	139	141	230	230	228	236	144	144	164	184	266	280	155	159			226	232	136	136	WLI	WLI	8
271	141	141	195	195	139	141	230	230	228	236	144	144	164	184	266	280	155	159			226	232	136	136	WLI	WLI	8
272	141	141	195	195	135	141	230	230	228	236	144	144	164	184	266	280	155	159			226	232	136	136	WLI	WLI	2
276/277	141	145	195	195	135	141	218	230	226	228	144	144	158	164	236	280	155	157			226	228	132	134	WLI	WLI	23
280	141	141	195	195	139	141	230	230	222	228	144	144	164	184	280	280	153	159			220	228	134	134	WLI	WLI	7
281/283	147	153	205	209	143	143	232	260	228	230	154	160	164	176	232	246	157	157	236	236	230	230	146	146	WLI	SLI	47
282	141	141	195	195	135	135	218	230	216	236	144	144	166	184	266	300	159	159			228	228	134	134	WLI	WLI	1
284	151	163	195	197	141	145	230	230	222	228	144	144	156	164	278	280	157	159			220	232	132	146	WLI	WLI	58

Fortsetzung **Tabelle 9.4-9**

Baum- NR	Kernmikrosatelliten-Genorte																								Morpholo- gisch	genetisch	Klone
	Tc5		Tc31		Tc6		Tc7		Tc4		Tc8		Tc915		Tc963		Tc951		Tc918		Tc920		Tc11				
183	185	185	205	209	127	139	238	266	224	230	152	152	180	192	230	240	0	0	236	236	228	228	146	152	SLI	SLI	75
231/232	141	151	197	203	141	145	218	218	222	222	144	144	156	164	264	266	157	159			226	228	136	136	WLI	WLI	35
237	141	151	195	197	135	141	230	230	216	228	144	144	156	184	266	270	155	159			220	226	132	134	WLI	WLI	30
238	157	159	209	209	141	141	238	238	228	228	152	160	152	188	230	266	157	157	236	236	228	232	150	150	SLI	SLI	65
239	157	159	207	209	141	141	238	238	228	228	152	160	152	188	230	266	157	157	236	236	228	234	150	150	SLI	SLI	C
240	157	159	207	209	141	141	238	238	228	228	152	160	152	188	230	266	157	157	236	236	228	234	150	150	SLI	SLI	C
241-246	147	159	205	209	129	141	244	248	224	230	162	168	192	192	266	266	0	0	236	236	228	232	146	152	SLI	SLI	49
470	147	185	209	213	141	143	238	248	228	230	154	160	158	158	230	282	151	157	236	236	228	232	150	150	SLI	SLI	51
51	145	153	215	215	141	143	238	244	224	228	166	168	158	176	236	238	169	169	236	236	228	232	152	152	SLI	SLI	46
77	149	153	199	201	127	143	238	244	232	232	160	172	158	176	232	282	157	157	234	236	228	228	150	150	SLI	SLI	52
127	141	151	195	203	135	145	230	230	222	228	144	144	164	164	0	0	159	159			226	226	132	146	WLI	WLI	32
144	147	173	209	213	137	143	266	276	224	228	162	164	152	192	254	268	163	163	236	236	228	228	144	150	SLI	SLI	50
148	141	141	195	203	137	137	218	230	226	236	144	144	164	184	266	280	155	159			226	226	134	134	WLI	WLI	12
168	161	171	199	205	133	135	238	244	230	232	162	162	152	188	230	236	157	157	236	236	228	228	146	146	SLI	SLI	73
259	153	185	199	205	143	143	232	236	230	230	154	160	158	176	238	266	157	157	236	236	226	232	148	150	SLI	SLI	64
6	141	141	195	195	137	141	230	230	228	236	144	144	164	184	266	280	155	159			226	232	136	136	WLI	WLI	6
14	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	134	134	WLI	WLI	A
12	157	161	205	205	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	234	146	146	SLI	SLI	66
13	157	161	205	207	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	234	146	146	SLI	SLI	E
31	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	136	136	WLI	WLI	B
30	141	141	197	203	137	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	136	136	WLI	WLI	18
32	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	264	266	157	159			226	232	134	134	WLI	WLI	16
57	149	157	199	205	139	141	232	242	228	230	164	168	152	166	266	284	157	157	236	236	226	230	158	158	SLI	SLI	54
130/131	153	159	199	205	133	143	242	242	230	230	160	164	158	158	230	266	151	151	236	236	228	228	150	150	SLI	SLI	63
150	151	165	195	197	141	145	230	230	222	232	144	144	154	184	264	286	155	159			220	232	132	132	WLI	WLI	59
151	151	165	195	197	141	145	230	230	222	232	144	144	154	184	264	286	155	159			220	232	132	132	WLI	WLI	59

Fortsetzung **Tabelle 9.4-9**

Baum-NR	Kernmikrosatelliten-Genorte																								Morphologisch	genetisch	Klone
	Tc5		Tc31		Tc6		Tc7		Tc4		Tc8		Tc915		Tc963		Tc951		Tc918		Tc920		Tc11				
236	157	161	205	207	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	232	146	146	SLI	SLI	D
237	157	161	205	207	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	232	146	146	SLI	SLI	D
238	157	161	205	207	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	232	146	146	SLI	SLI	D
239	157	161	205	207	129	141	238	238	228	230	154	154	158	188	230	240	157	157	236	236	228	234	146	146	SLI	SLI	E
286	141	141	195	195	141	141	230	230	228	236	144	144	164	164	266	266	155	155			232	232	134	134	WLI	WLI	9
296	147	157	201	205	127	143	244	266	224	228	150	160	156	160	230	232	149	157	236	236	228	230	144	146	SLI	SLI	48
299	141	141	195	195	137	141	230	230	228	232	144	144	156	184	270	280	159	161			226	234	138	138	WLI	WLI	5
300	141	151	195	197	135	139	230	230	228	236	144	144	176	184	266	280	155	159			220	226	154	158	WLI	WLI	29
301	141	151	195	195	135	141	230	230	228	228	144	144	160	184	266	266	159	161			220	232	134	134	WLI	WLI	26
304	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	282	157	159			226	232	134	134	WLI	WLI	17
305	141	141	197	203	135	141	218	230	222	226	144	144	164	164	266	266	157	159			226	232	136	136	WLI	WLI	B
320	141	151	195	197	135	135	230	230	226	228	144	144	0	0	0	0	0	0			0	0	134	134	WLI	WLI	27
330	141	196	197	213	141	147	218	230	226	236	144	144	164	164	266	268	157	159			222	226	136	136	WLI	WLI	43

Tab.9.4-10: Kluppliste der Erstinventur Fläche *Hang* 1968 (Status 100 = lebend; 200 = frisch abgestorben; 300 = seit längerem abgestorben)

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
1	1130	36,00	Buche	100	30	80	13,00	Berg-Ahorn	100
2	1210	42,00	Buche	100	31	140	18,00	Berg-Ahorn	100
3	95	9,00	Berg-Ahorn	100	32	55	11,00	Berg-Ahorn	100
4	55	8,50	Berg-Ahorn	100	33	70	13,50	Berg-Ahorn	100
5	70	10,50	Berg-Ahorn	100	34	65	11,00	Berg-Ahorn	100
6	65	9,50	Berg-Ahorn	100	35	95	10,00	Berg-Ahorn	100
7	70	9,50	Berg-Ahorn	100	36	190	18,00	Berg-Ulme	100
8	75	11,00	Buche	100	37	150	17,00	Berg-Ahorn	100
9	60	7,50	Berg-Ahorn	100	38	115	17,00	Berg-Ahorn	100
10	130	13,50	Berg-Ahorn	100	39	200	18,50	Berg-Ahorn	100
11	50	8,50	Berg-Ahorn	100	40	50	7,00	Berg-Ulme	100
12	50	8,50	Berg-Ahorn	100	41	50	4,50	Berg-Ulme	100
13	150	6,50	Berg-Ahorn	100	42	190	21,50	Berg-Ahorn	100
14	75	13,00	Berg-Ahorn	100	43	45	9,00	Berg-Ahorn	100
15	135	13,00	Berg-Ahorn	100	44	170	21,50	Berg-Ahorn	100
16	80	9,00	Berg-Ahorn	100	45	230	22,50	Berg-Ahorn	100
17	570	31,00	Berg-Ahorn	100	46	120	12,50	Berg-Ulme	100
18	55	7,00	Buche	100	47	60	12,00	Berg-Ahorn	100
19	55	7,50	Buche	100	48	60	7,50	Winter-Linde	100
20	850	15,50	Buche	300	49	930	38,50	Buche	100
21	840	38,50	Buche	100	50	790	7,00	Buche	300
22	60	8,50	Sommer-Linde	100	51	150	11,50	Sommer-Linde	100
23	1130	36,00	Berg-Ulme	100	52	80	3,50	Winter-Linde	100
24	1210	42,00	Berg-Ulme	100	54	60	8,00	Berg-Ahorn	100
25	90	12,00	Berg-Ahorn	100	55	70	8,00	Berg-Ahorn	100
26	120	15,50	Berg-Ahorn	100	56	50	7,50	Berg-Ahorn	100
27	45	7,50	Berg-Ahorn	100	57	80	10,50	Berg-Ahorn	100
28	85	12,00	Berg-Ahorn	100	58	190	23,50	Berg-Ahorn	100
29	60	11,50	Berg-Ahorn	100	59	200	17,00	Berg-Ulme	100

Fortsetzung Kluppliste Erstinventur *Hang* 1968

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
60	90	11,00	Berg-Ahorn	100	89	100	13,00	Berg-Ahorn	100
61	80	8,50	Berg-Ulme	100	90	70	12,50	Buche	100
62	230	17,50	Berg-Ulme	100	91	80	10,00	Buche	100
63	130	8,50	Berg-Ahorn	100	92	90	9,00	Buche	100
64	50	6,00	Buche	100	93	70	8,50	Buche	100
65	60	9,00	Berg-Ahorn	100	94	220	20,50	Hainbuche	100
66	80	11,50	Berg-Ahorn	100	95	950	5,00	Buche	300
67	70	8,50	Berg-Ahorn	100	96	400	21,00	Buche	100
68	60	8,50	Buche	100	97	330	20,50	Berg-Ulme	100
69	50	8,50	Berg-Ahorn	100	98	200	20,50	Buche	100
70	60	7,50	Berg-Ahorn	100	99	940	40,00	Buche	100
71	40	6,50	Berg-Ahorn	100	100	50	8,00	Buche	100
72	50	8,00	Berg-Ahorn	100	102	970	9,00	Buche	
73	60	6,50	Winter-Linde	100	103	350	19,50	Buche	100
74	40	4,00	Berg-Ahorn	100	105	70	9,00	Buche	100
75	70	8,00	Winter-Linde	100	106	80	12,00	Buche	100
76	70	8,00	Buche	100	108	100	11,50	Buche	100
77	410	22,00	Sommer-Linde	100	109	70	16,00	Buche	100
78	60	6,00	Berg-Ahorn	100	110	70	8,50	Buche	100
79	80	5,50	Berg-Ahorn	100	111	110	17,00	Berg-Ahorn	100
80	400	25,50	Buche	100	112	180	19,00	Berg-Ahorn	100
81	90	13,00	Buche	100	113	50	8,00	Winter-Linde	100
82	150	15,50	Berg-Ahorn	100					
83	60	7,00	Winter-Linde	100					
84	70	11,00	Buche	100					
85	100	11,50	Winter-Linde	100					
86	60	10,50	Buche	100					
87	60	9,00	Buche	100					
88	100	11,50	Berg-Ahorn	100					

Tab.9.4-11: Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Hang* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
1	1135	7,95	Buche	300	64	163	15,87	Buche	100
2	1050	1,08	Buche	300	68	212	19,75	Buche	100
3	366	25,90	Berg-Ahorn	100	70	278	19,19	Berg-Ahorn	100
4	454	27,80	Berg-Ahorn	100	72	317	15,09	Berg-Ahorn	100
5	440	26,80	Berg-Ahorn	100	73	232	19,12	Berg-Ulme	100
6	285	26,73	Berg-Ahorn	100	77	658	27,47	Sommer-Linde	100
7	123	15,23	Berg-Ahorn	100	78	206	17,10	Buche	100
9	328	27,43	Berg-Ahorn	100	80	519	14,67	Buche	200
10	443	29,78	Berg-Ahorn	100	81	188	20,00	Buche	100
14	306	24,01	Berg-Ahorn	100	82	428	25,01	Berg-Ahorn	100
15	476	30,58	Berg-Ahorn	100	84	275	28,20	Buche	100
17	864	32,40	Berg-Ahorn	100	85	314	22,68	Berg-Ulme	200
18	159	16,07	Buche	100	86	122	17,17	Buche	100
19	205	30,29	Buche	100	87	159	19,00	Buche	100
21	1043	33,84	Buche	100	88	300	26,08	Berg-Ahorn	100
23	140	2,00	Berg-Ulme	200	89	412	28,74	Berg-Ahorn	100
26	186	21,27	Berg-Ahorn	100	90	150	18,95	Buche	100
31	320	31,51	Berg-Ahorn	100	91	101	12,53	Buche	100
32	106	11,23	Berg-Ahorn	100	92	126	12,70	Buche	100
40	104	9,43	Berg-Ulme	100	93	99	8,85	Buche	100
44	255	27,39	Berg-Ahorn	100	94	359	29,10	Hainbuche	100
45	500	36,55	Berg-Ahorn	100	96	777	31,18	Buche	100
48	208	13,58	Winter-Linde	100	98	527	32,28	Buche	100
49	1146	22,89	Buche	200	100	170	24,59	Buche	100
51	398	25,69	Sommer-Linde	100	102	1024	9,46	Buche	200
54	392	26,18	Berg-Ahorn	100	103	703	34,98	Buche	100
55	360	25,84	Berg-Ahorn	100	105	325	31,42	Buche	100
57	394	23,02	Berg-Ahorn	100	108	230	21,23	Buche	100
63	237	19,76	Berg-Ahorn	100	109	145	22,14	Buche	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Hang* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
111	405	30,05	Berg-Ahorn	100	154	463	22,33	Spitz-Ahorn	100
112	378	28,80	Berg-Ahorn	100	155	219	18,63	Berg-Ahorn	100
113	186	22,17	Berg-Ulme	100	156	260	21,86	Berg-Ahorn	100
115	54	6,03	Berg-Ahorn	100	158	321	20,75	Berg-Ahorn	100
116	83	11,93	Berg-Ahorn	100	159	217	21,20	Berg-Ahorn	100
117	259	18,17	Berg-Ahorn	100	160	52	5,90	Berg-Ahorn	100
120	146	16,71	Berg-Ahorn	100	162	173	20,03	Berg-Ahorn	100
121	266	20,00	Berg-Ahorn	100	163	207	19,21	Berg-Ahorn	100
122	149	21,44	Berg-Ahorn	100	165	115	14,23	Berg-Ahorn	100
123	40	4,50	Berg-Ahorn	200	166	171	20,45	Berg-Ahorn	100
124	72	9,83	Berg-Ahorn	200	167	183	23,38	Berg-Ahorn	100
125	182	19,01	Berg-Ahorn	100	168	42	3,84	Sommer-Linde	100
126	95	13,75	Berg-Ahorn	100	169	72	12,30	Berg-Ahorn	200
127	208	20,38	Winter-Linde	100	170	95	10,63	Berg-Ahorn	100
130	45	8,48	Berg-Ahorn	200	171	29	4,75	Berg-Ahorn	200
131	26	5,30	Berg-Ahorn	200	172	379	21,01	Spitz-Ahorn	100
132	88	12,59	Berg-Ahorn	100	173	256	21,52	Berg-Ahorn	100
135	95	10,39	Berg-Ahorn	100	174	95	14,77	Berg-Ahorn	100
137	228	19,88	Berg-Ahorn	100	175	38	6,90	Berg-Ahorn	200
138	121	13,95	Berg-Ahorn	100	176	67	8,06	Berg-Ahorn	100
141	56	2,00	Winter-Linde	200	177	227	20,67	Berg-Ahorn	100
142	228	19,25	Berg-Ahorn	100	178	33	5,67	Berg-Ulme	100
143	125	17,02	Berg-Ahorn	100	179	52	5,59	Berg-Ahorn	100
144	68	8,02	Sommer-Linde	100	181	25	4,23	Berg-Ahorn	100
145	57	8,60	Berg-Ahorn	300	183	31	4,42	Berg-Ahorn	100
146	88	11,50	Berg-Ahorn	300	184	99	10,41	Buche	100
147	36	4,55	Berg-Ahorn	300	185	30	4,91	Berg-Ahorn	100
148	95	12,36	Winter-Linde	100	186	80	5,65	Berg-Ahorn	100
149	231	18,79	Berg-Ahorn	100	187	38	3,61	Berg-Ahorn	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Hang* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
188	42	7,50	Berg-Ahorn	100	226	49	6,76	Buche	100
189	88	12,05	Buche	100	227	51	7,64	Buche	100
190	154	18,54	Buche	100	228	36	4,44	Buche	100
191	68	9,29	Berg-Ahorn	100	229	33	5,49	Buche	100
192	35	2,50	Buche	100	230	37	5,70	Buche	100
193	156	20,10	Buche	100	231	131	13,71	Berg-Ulme	100
196	33	3,50	Buche	300	232	100	15,62	Spitz-Ahorn	100
200	18	2,00	Buche	200	233	31	3,97	Buche	100
201	52	6,08	Buche	100	234	38	4,75	Buche	100
202	47	5,91	Buche	100	235	60	7,42	Buche	100
203	88	12,20	Buche	100	236	44	6,33	Buche	100
204	92	8,71	Buche	100	237	32	1,30	Buche	200
205	65	8,33	Buche	100	238	101	13,55	Buche	100
206	33	5,20	Buche	200	239	69	7,63	Buche	100
208	165	24,30	Buche	100	240	78	12,72	Buche	100
209	111	19,58	Buche	100	242	67	9,91	Buche	100
210	153	25,15	Buche	100	243	45	3,52	Buche	100
211	87	13,14	Buche	300	246	114	15,85	Berg-Ahorn	100
213	153	17,98	Berg-Ahorn	100	247	35	5,03	Buche	100
214	83	10,56	Buche	100	248	176	16,41	Berg-Ahorn	100
215	226	25,59	Buche	100	249	90	7,76	Berg-Ahorn	100
216	88	12,29	Buche	100	251	291	25,21	Berg-Ahorn	100
217	94	7,41	Buche	100	252	58	6,88	Berg-Ahorn	100
218	111	14,15	Buche	100	253	55	7,67	Berg-Ahorn	100
219	125	16,99	Buche	100	254	32	4,90	Berg-Ahorn	100
220	82	8,87	Buche	100	255	41	5,12	Berg-Ahorn	100
222	37	2,97	Buche	100	256	25	3,60	Berg-Ahorn	200
223	72	8,92	Buche	100	257	357	24,60	Berg-Ahorn	100
225	70	11,22	Spitz-Ahorn	100	258	371	26,66	Berg-Ahorn	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Hang* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
259	215	21,73	Sommer-Linde	100
260	248	26,46	Berg-Ahorn	100
261	332	22,55	Berg-Ahorn	100
262	63	7,00	Spitz-Ahorn	200
263	60	5,60	Berg-Ahorn	200
264	150	15,05	Berg-Ahorn	100
265	336	21,50	Spitz-Ahorn	100
266	150	14,14	Berg-Ahorn	200
267	82	9,51	Buche	100
268	78	6,30	Berg-Ahorn	200
269	106	11,22	Berg-Ahorn	100
271	30	3,67	Berg-Ulme	100
273	149	10,83	Buche	200
274	60	5,42	Buche	100
275	128	11,38	Buche	100
276	135	19,35	Buche	100
277	216	23,81	Buche	100
278	47	6,54	Buche	100
279	47	6,70	Berg-Ulme	200
280	79	9,02	Buche	100
281	34	4,75	Buche	100
282	40	4,32	Buche	100
283	54	4,73	Buche	100
284	98	12,93	Berg-Ulme	100
300	16	1,30	Buche	200
301	49	6,04	Buche	100
302	40	4,05	Buche	100
303	1487	40,00	Buche	100
331	48	4,50	Buche	100

Tab.9.4-12: Kluppliste der Erstinventur Fläche *Kuppe* 1958 (Status 100 = lebend; 200 = frisch abgestorben; 300 = seit längerem abgestorben)

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
1	518	30,00	Buche	100
2	623	32,00	Buche	100
3	554	32,00	Buche	100
4	738	33,00	Buche	100
5	380	31,00	Hainbuche	100
6	734	31,00	Winter-Linde	100
7	778	31,00	Buche	100
8	696	36,00	Buche	100
9	965	34,00	Buche	100
10	748	36,00	Buche	100
11	581	32,00	Buche	100
12	918	35,00	Sommer-Linde	100
13	154	4,00	Sommer-Linde	100
14	788	30,00	Winter-Linde	100
15	910	35,00	Buche	100
16	748	32,00	Buche	100
17	390	21,00	Hainbuche	100
18	448	25,00	Hainbuche	100
19	535	27,00	Buche	100
20	794	33,00	Buche	100
21	608	28,00	Buche	100
22	404	27,00	Eiche	100
23	875	32,00	Spitz-Ahorn	100
24	747	34,00	Buche	100
25	772	34,00	Buche	100
26	890	34,00	Buche	100
27	666	33,00	Buche	100
28	838	34,00	Buche	100

Tab.9.4-13: Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
5	544	23,27	Hainbuche	100	48	42	6,86	Berg-Ahorn	100
6	1020	19,96	Winter-Linde	100	49	65	10,48	Berg-Ahorn	100
12	1148	38,24	Sommer-Linde	100	50	290	20,10	Berg-Ahorn	100
13	265	9,40	Sommer-Linde	100	51	55	6,29	Berg-Ahorn	100
14	925	31,73	Winter-Linde	100	52	45	7,64	Berg-Ahorn	200
17	643	24,56	Hainbuche	100	53	227	20,56	Berg-Ahorn	100
19	575	3,20	Buche	200	54	25	2,38	Winter-Linde	100
20	1021	37,64	Buche	100	55	399	24,56	Buche	100
25	862	30,61	Buche	100	56	68	6,66	Sommer-Linde	100
26	1143	33,24	Buche	100	57	28	3,70	Sommer-Linde	100
27	799	26,85	Buche	200	58	32	4,51	Berg-Ahorn	100
28	702	1,42	Buche	200	59	80	9,53	Berg-Ahorn	100
29	191	16,62	Buche	100	60	45	6,95	Berg-Ahorn	100
30	142	11,60	Winter-Linde	100	61	22	3,50	Buche	100
31	147	8,33	Winter-Linde	100	62	42	6,89	Buche	100
32	172	18,05	Winter-Linde	100	63	15	1,60	Sommer-Linde	100
33	125	14,92	Winter-Linde	100	64	32	5,41	Buche	100
34	70	9,87	Winter-Linde	100	65	36	4,52	Buche	100
35	110	13,00	Winter-Linde	100	66	23	3,80	Buche	100
38	224	16,45	Berg-Ahorn	100	67	44	7,71	Berg-Ulme	100
39	160	11,26	Berg-Ulme	200	68	67	8,39	Buche	100
40	307	20,61	Berg-Ahorn	100	69	199	19,87	Berg-Ahorn	100
41	124	13,94	Spitz-Ahorn	100	70	193	20,16	Berg-Ahorn	100
42	50	7,53	Berg-Ahorn	100	71	231	19,48	Berg-Ahorn	100
43	162	16,74	Berg-Ahorn	100	72	31	2,60	Berg-Ahorn	100
44	195	16,59	Berg-Ahorn	100	73	269	20,75	Berg-Ahorn	100
45	80	11,72	Berg-Ahorn	200	74	53	7,85	Berg-Ahorn	200
46	126	18,28	Berg-Ahorn	100	75	102,274	10,58	Berg-Ahorn	110,8
47	85	10,13	Berg-Ahorn	100	76	63	9,71	Berg-Ahorn	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
77	77	9,10	Berg-Ahorn	300	106	26	3,60	Berg-Ahorn	100
78	159	18,89	Berg-Ahorn	100	107	94	8,28	Berg-Ulme	200
79	194	19,40	Berg-Ahorn	100	108	45	7,09	Berg-Ahorn	100
80	43	5,65	Spitz-Ahorn	100	109	149	13,88	Berg-Ahorn	100
81	168	18,60	Berg-Ahorn	100	110	13	2,10	Buche	100
82	23	3,40	Spitz-Ahorn	100	111	39	6,18	Berg-Ahorn	100
83	162	18,12	Berg-Ahorn	100	112	194	18,33	Berg-Ahorn	100
84	33	4,01	Berg-Ulme	100	113	35	4,89	Spitz-Ahorn	100
85	221	17,89	Berg-Ahorn	100	114	139	17,49	Berg-Ahorn	100
86	24	3,50	Berg-Ulme	100	115	39	5,01	Spitz-Ahorn	100
87	165	17,45	Berg-Ahorn	100	116	151	15,11	Berg-Ahorn	100
88	64	10,39	Berg-Ahorn	100	117	145	15,98	Berg-Ahorn	100
89	54	10,15	Berg-Ahorn	100	118	35	3,80	Berg-Ahorn	200
90	58	5,91	Buche	100	119	56	10,40	Berg-Ahorn	100
91	23	3,20	Buche	100	120	34	6,28	Berg-Ahorn	100
92	22	2,80	Berg-Ulme	100	121	46	6,25	Buche	100
93	146	15,52	Berg-Ahorn	100	122	26	4,58	Buche	100
94	199	17,84	Berg-Ahorn	100	123	29	5,08	Buche	100
95	232	18,40	Berg-Ahorn	100	124	24	5,20	Buche	100
96	46	5,64	Berg-Ulme	100	125	27	5,40	Buche	100
97	49	7,43	Berg-Ahorn	100	126	38	5,90	Buche	100
98	248	17,86	Berg-Ahorn	100	127	51	8,76	Buche	100
99	155	16,65	Berg-Ahorn	100	128	35	5,40	Buche	100
100	31	4,83	Berg-Ahorn	100	129	1	1,60	Berg-Ulme	100
101	101	13,03	Berg-Ahorn	100	130	123	13,11	Sommer-Linde	100
102	76	11,49	Berg-Ahorn	100	131	124	13,12	Sommer-Linde	100
103	45	7,41	Berg-Ahorn	100	132	115	16,24	Berg-Ahorn	100
104	18	2,80	Berg-Ahorn	100	133	43	6,99	Berg-Ahorn	100
105	23	2,70	Berg-Ahorn	100	134	23	3,40	Berg-Ahorn	200

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
135	231	18,03	Berg-Ahorn	100	164	47	7,50	Winter-Linde	100
136	114	16,06	Berg-Ahorn	100	165	41	7,83	Berg-Ahorn	100
137	30	5,75	Berg-Ahorn	100	166	33	2,70	Berg-Ahorn	200
138	20	3,30	Berg-Ahorn	100	167	61	13,00	Berg-Ahorn	100
139	209	18,21	Berg-Ahorn	100	168	67	12,29	Berg-Ahorn	100
140	83	12,10	Berg-Ahorn	100	169	85	14,13	Berg-Ahorn	100
141	70	12,37	Berg-Ahorn	100	170	32	5,42	Berg-Ahorn	100
142	54	11,49	Berg-Ahorn	100	171	19	1,80	Berg-Ahorn	300
143	212	19,18	Berg-Ahorn	100	172	95	14,46	Berg-Ahorn	100
144	36	3,50	Berg-Ahorn	200	173	104	14,89	Berg-Ahorn	100
145	17	3,20	Berg-Ahorn	100	174	31	3,56	Berg-Ahorn	100
146	140	20,08	Berg-Ahorn	100	175	64	8,34	Berg-Ahorn	100
147	49	9,75	Berg-Ahorn	100	176	34	4,92	Berg-Ahorn	100
148	28	4,29	Berg-Ahorn	100	177	19	2,10	Winter-Linde	100
149	40	6,97	Berg-Ahorn	100	178	159	17,00	Berg-Ahorn	100
150	226	19,15	Winter-Linde	100	179	252	18,48	Berg-Ahorn	100
151	23	2,70	Winter-Linde	100	180	163	17,21	Berg-Ahorn	100
152	40	4,67	Berg-Ahorn	100	181	42	5,22	Berg-Ahorn	100
153	42	7,55	Berg-Ahorn	100	182	34	6,33	Berg-Ahorn	100
154	38	4,84	Winter-Linde	100	183	49	5,75	Berg-Ahorn	300
155	43	4,96	Winter-Linde	100	184	51	8,25	Berg-Ahorn	100
156	41	4,20	Berg-Ahorn	200	185	122	15,48	Berg-Ahorn	100
157	53	9,13	Berg-Ahorn	300	186	25	3,50	Berg-Ahorn	200
158	52	8,86	Berg-Ahorn	100	187	121	16,80	Berg-Ahorn	100
159	44	8,69	Berg-Ahorn	100	188	133	16,52	Berg-Ahorn	100
160	28	3,71	Berg-Ahorn	300	189	142	16,94	Berg-Ahorn	100
161	42	7,99	Berg-Ahorn	300	190	33	3,35	Winter-Linde	100
162	34	7,02	Berg-Ahorn	200	191	178	16,30	Winter-Linde	100
163	165	17,13	Gemeine Esche	100	192	70	6,02	Winter-Linde	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
193	29	4,30	Berg-Ahorn	100	223	33	3,50	Buche	100
194	37	3,40	Berg-Ahorn	100	224	20	2,80	Buche	100
195	40	3,70	Berg-Ahorn	200	225	22	2,30	Berg-Ulme	100
196	27	3,27	Berg-Ahorn	100	226	56	5,94	Winter-Linde	100
197	30	3,50	Berg-Ahorn	100	227	46	4,68	Sommer-Linde	100
198	24	3,20	Berg-Ahorn	100	228	33	5,24	Winter-Linde	100
199	136	14,75	Berg-Ahorn	100	229	35	4,10	Buche	100
200	101	7,78	Winter-Linde	100	230	31	4,37	Berg-Ulme	100
201	15	2,20	Buche	100	231	25	3,20	Buche	100
202	125	18,04	Buche	100	232	20	2,50	Buche	100
203	243	19,79	Winter-Linde	100	233	77	9,32	Berg-Ulme	100
204	147	14,99	Sommer-Linde	100	234	18	2,20	Buche	100
205	212	21,70	Berg-Ahorn	100	235	87	10,33	Berg-Ulme	100
206	216	20,45	Berg-Ahorn	100	236	28	2,50	Sommer-Linde	100
207	172	17,25	Winter-Linde	100	237	34	2,90	Sommer-Linde	100
208	23	3,60	Winter-Linde	300	238	29	2,00	Sommer-Linde	100
209	232	20,34	Berg-Ahorn	100	239	25	2,20	Sommer-Linde	100
210	170	18,81	Berg-Ahorn	100	240	9	2,20	Berg-Ulme	100
211	183	20,23	Berg-Ahorn	100	241	29	3,40	Berg-Ulme	100
212	15	3,20	Winter-Linde	100	242	40	4,20	Berg-Ulme	100
213	43	5,38	Berg-Ahorn	100	243	73	9,56	Berg-Ulme	100
214	40	8,59	Berg-Ahorn	100	244	25	2,70	Buche	100
215	73	5,34	Winter-Linde	100	245	8	1,80	Buche	100
216	64	7,90	Winter-Linde	100	246	64	9,06	Berg-Ulme	100
217	168	15,89	Winter-Linde	100	247	26	2,70	Buche	100
218	197	15,52	Winter-Linde	100	248	75	7,04	Berg-Ulme	200
219	78	12,22	Berg-Ahorn	100	249	21	2,30	Sommer-Linde	100
220	28	2,00	Winter-Linde	100	250	21	1,95	Buche	100
221	18	2,20	Buche	100	251	268	16,10	Winter-Linde	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
252	84	8,69	Winter-Linde	100	281	82	11,65	Winter-Linde	100
253	313	19,28	Berg-Ahorn	100	282	184	15,52	Winter-Linde	100
254	60	4,70	Spitz-Ahorn	100	283	175	14,38	Sommer-Linde	100
255	249	19,34	Berg-Ahorn	100	284	85	11,32	Winter-Linde	100
256	90	2,60	Sambucus nigra	100	285	129	12,73	Berg-Ulme	200
257	101	3,60	Sambucus nigra	100	286	55	5,85	Winter-Linde	100
258	18	2,90	Berg-Ulme	100	287	100	5,52	Sambucus nigra	200
259	25	2,60	Berg-Ulme	200	288	90	3,40	Sambucus nigra	100
260	260	18,09	Spitz-Ahorn	100	289	30	2,00	Sambucus nigra	200
261	218	11,93	Berg-Ulme	200	290	62	3,50	Sambucus nigra	100
262	142	16,22	Berg-Ahorn	100	291	99	13,50	Berg-Ahorn	100
263	163	13,62	Berg-Ulme	300	292	18	2,80	Spitz-Ahorn	100
264	39	4,10	Buche	100	293	23	2,50	Sambucus nigra	100
265	141	13,67	Berg-Ahorn	200	294	318	20,33	Berg-Ahorn	100
266	228	20,65	Spitz-Ahorn	100	295	317	20,26	Berg-Ahorn	100
267	33	2,80	Spitz-Ahorn	100	296	113	10,26	Sommer-Linde	100
268	101	17,21	Berg-Ahorn	100	297	66	11,38	Berg-Ahorn	100
269	166	16,73	Spitz-Ahorn	100	298	189	18,43	Berg-Ahorn	100
270	96	16,04	Winter-Linde	100	299	289	18,02	Winter-Linde	100
271	171	17,46	Winter-Linde	100	300	75	7,40	Winter-Linde	100
272	85	12,56	Winter-Linde	100	301	242	17,70	Winter-Linde	100
273	157	12,61	Berg-Ulme	200	302	82	8,58	Winter-Linde	200
274	98	7,39	Berg-Ulme	200	303	102	8,30	Winter-Linde	300
275	315	20,94	Gemeine Esche	100	304	107	12,21	Winter-Linde	100
276	290	22,51	Winter-Linde	100	305	97	9,89	Winter-Linde	100
277	284	21,45	Winter-Linde	100	306	94	10,92	Buche	100
278	111	12,49	Buche	100	307	58	8,13	Buche	100
279	83	12,06	Winter-Linde	100	308	163	17,23	Berg-Ulme	100
280	115	12,60	Winter-Linde	100	309	98	14,22	Berg-Ulme	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Kuppe* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
310	20	3,30	Berg-Ulme	100	1250	167	18,93	Berg-Ahorn	100
311	75	12,99	Berg-Ahorn	100	1260	102	13,54	Berg-Ahorn	100
312	76	8,50	Berg-Ulme	200	1270	213	19,97	Winter-Linde	100
313	38	6,87	Hainbuche	100	1300	50	7,03	Berg-Ahorn	200
314	80	8,08	Berg-Ulme	100	1310	25	3,20	Berg-Ahorn	200
315	40	6,93	Buche	100	1320	90	12,57	Berg-Ahorn	100
316	96	15,58	Berg-Ahorn	100	1350	94	10,65	Berg-Ahorn	100
317	40	5,58	Berg-Ulme	100	1370	233	20,56	Berg-Ahorn	100
318	34	3,10	Buche	100	1380	120	13,91	Berg-Ahorn	100
319	36	4,50	Berg-Ulme	100	1410	64	1,85	Berg-Ahorn	200
320	39	4,05	Winter-Linde	100	1420	240	19,19	Berg-Ahorn	100
321	30	3,70	Berg-Ahorn	100					
322	29	3,40	Berg-Ahorn	100					
323	45	8,83	Berg-Ulme	100					
324	123	14,16	Hainbuche	100					
325	19	2,20	Berg-Ulme	100					
326	20	1,60	Sambucus nigra	100					
327	31	2,80	Sambucus nigra	100					
328	12	2,30	Berg-Ulme	100					
329	28	3,50	Berg-Ulme	100					
330	57	7,82	Winter-Linde	100					
1150	62	6,28	Berg-Ahorn	100					
1160	82	13,28	Berg-Ahorn	100					
1170	272	21,25	Berg-Ahorn	100					
1200	150	16,74	Berg-Ahorn	100					
1210	270	19,75	Berg-Ahorn	100					
1220	155	20,75	Berg-Ahorn	100					
1230	48	5,24	Berg-Ahorn	200					
1240	74	9,25	Berg-Ahorn	200					

Tab.9.4-14: Kluppliste der Erstinventur Fläche *Senke* 1958 (Status 100 = lebend; 200 = frisch abgestorben; 300 = seit längerem abgestorben)

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
1	762	34,50	Spitz-Ahorn	100	30	150	15,50	Buche	100
2	590	36,00	Berg-Ahorn	100	31	201	11,70	Sommer-Linde	100
3	924	40,40	Buche	100	32	116	13,20	Buche	100
4	768	38,50	Buche	100	33	78	10,00	Buche	100
5	928	38,50	Buche	100	34	658	34,80	Buche	100
6	153	11,50	Buche	100	35	144	11,30	Buche	100
7	844	35,80	Buche	100	36	71	7,80	Buche	100
8	411	26,80	Hainbuche	100	37	90	8,60	Berg-Ulme	100
9	107	7,50	Winter-Linde	100	38	103	9,50	Berg-Ulme	100
10	976	37,80	Buche	100	39	103	9,70	Berg-Ahorn	100
11	703	32,50	Buche	100	40	74	7,50	Buche	100
12	1086	36,00	Buche	100	41	818	39,00	Buche	100
13	244	17,80	Buche	100	42	128	11,80	Buche	100
14	72	9,80	Berg-Ahorn	100	43	86	10,00	Buche	100
15	71	10,40	Berg-Ahorn	100	44	654	33,00	Spitz-Ahorn	100
16	114	11,20	Buche	100	45	1050	39,40	Buche	100
17	248	15,50	Buche	100	46	88	7,00	Buche	100
18	148	14,00	Berg-Ahorn	100	47	98	8,70	Sommer-Linde	100
19	83	11,20	Buche	100	48	1054	37,80	Buche	100
20	273	18,50	Spitz-Ahorn	100	49	116	14,00	Buche	100
21	114	7,80	Winter-Linde	100	50	128	14,20	Buche	100
22	218	16,80	Spitz-Ahorn	100	51	100	10,50	Buche	100
23	168	16,50	Buche	100	52	148	15,50	Buche	100
24	122	15,20	Berg-Ulme	100	53	124	12,00	Buche	100
25	102	10,20	Sommer-Linde	100	54	114	5,50	Winter-Linde	100
26	90	12,00	Buche	100	55	82	4,50	Winter-Linde	100
27	72	8,00	Winter-Linde	100	56	844	35,00	Buche	100
28	166	16,20	Buche	100	57	1078	39,80	Buche	100
29	121	14,20	Buche	100	58	84	8,80	Buche	100

Fortsetzung Kluppliste Erstinventur *Senke* 1958

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
59	72	5,80	Winter-Linde	100
60	91	7,20	Winter-Linde	100
61	94	3,90	Sommer-Linde	100
62	85	5,30	Sommer-Linde	100
63	91	4,80	Sommer-Linde	100

Tab.9.4-15: Kluppliste der Wiederholungsinventur Fläche *Senke* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
2	765	36,00	Berg-Ahorn	100	69	339	23,68	Berg-Ahorn	100
6	285	14,89	Buche	100	70	227	15,60	Berg-Ulme	300
14	232	25,53	Berg-Ahorn	100	71	248	20,87	Buche	100
15	435	25,66	Berg-Ahorn	100	72	177	21,94	Buche	100
25	335	19,26	Sommer-Linde	100	73	97	8,33	Buche	100
30	487	29,51	Buche	100	74	72	8,11	Buche	100
31	455	23,45	Sommer-Linde	100	75	345	24,16	Buche	100
32	462	27,89	Buche	100	76	364	25,86	Berg-Ahorn	100
33	247	27,44	Buche	100	77	77	7,25	Buche	100
35	532	31,66	Buche	100	78	303	23,45	Berg-Ahorn	100
40	373	27,83	Buche	100	79	308	24,07	Berg-Ahorn	100
41	1020	31,15	Buche	100	80	154	20,74	Buche	100
42	411	32,20	Buche	100	81	307	24,74	Buche	100
43	257	28,56	Buche	100	82	218	21,72	Buche	100
44	830	28,83	Spitz-Ahorn	100	83	85	10,56	Buche	100
48	1149	13,12	Buche	200	84	333	24,33	Berg-Ahorn	100
49	381	26,11	Buche	100	85	226	23,72	Berg-Ahorn	100
51	427	27,74	Buche	100	86	106	1,80	Berg-Ahorn	200
52	575	32,24	Buche	100	87	328	25,46	Berg-Ahorn	100
54	402	22,42	Winter-Linde	100	88	226	25,37	Berg-Ahorn	100
55	220	7,35	Winter-Linde	100	89	262	24,78	Berg-Ahorn	100
58	593	26,83	Buche	100	90	307	25,37	Berg-Ahorn	100
61	465	3,90	Sommer-Linde	100	91	20	2,30	Sambucus nigra	100
62	255	19,89	Sommer-Linde	100	92	348	28,14	Buche	100
64	308	22,45	Berg-Ahorn	100	93	263	26,06	Buche	100
65	258	26,75	Buche	100	94	65	8,75	Buche	100
66	558	29,97	Buche	100	95	67	7,04	Buche	100
67	328	23,34	Buche	100	96	333	29,09	Berg-Ahorn	100
68	281	21,35	Berg-Ahorn	100	97	271	26,64	Berg-Ahorn	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur Senke 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
98	44	7,01	Buche	100	128	345	23,97	Berg-Ahorn	100
99	372	26,01	Berg-Ahorn	100	129	348	25,20	Berg-Ahorn	100
100	285	25,33	Berg-Ahorn	100	130	279	23,21	Berg-Ahorn	100
101	245	21,95	Winter-Linde	100	131	184	22,45	Berg-Ahorn	100
102	71	10,34	Buche	100	132	304	26,87	Berg-Ahorn	100
103	52	3,00	Berg-Ahorn	200	133	138	25,50	Berg-Ahorn	100
104	108	16,63	Buche	100	134	271	25,65	Berg-Ahorn	100
105	377	27,46	Buche	100	135	195	23,28	Berg-Ahorn	100
106	45	6,23	Buche	100	136	234	24,24	Berg-Ahorn	100
107	107	12,00	Buche	100	137	187	23,58	Berg-Ahorn	100
108	48	3,44	Winter-Linde	100	138	52	3,50	Berg-Ulme	100
109	298	23,60	Berg-Ahorn	100	139	157	15,80	Winter-Linde	100
110	272	24,12	Berg-Ahorn	100	140	112	18,67	Rot-Erle	100
111	178	21,63	Buche	100	141	418	25,25	Rot-Erle	100
112	332	25,55	Berg-Ahorn	100	142	211	20,37	Gemeine Esche	100
113	131	18,16	Berg-Ahorn	100	143	167	19,22	Berg-Ahorn	100
114	165	21,89	Berg-Ahorn	100	144	72	10,73	Buche	100
115	47	7,46	Berg-Ahorn	200	145	234	24,47	Berg-Ahorn	100
116	47	2,80	Sommer-Linde	300	146	36	5,13	Berg-Ulme	100
117	217	15,06	Sommer-Linde	100	147	167	23,34	Berg-Ahorn	100
118	307	20,22	Berg-Ahorn	100	148	132	20,21	Spitz-Ahorn	100
119	242	19,75	Buche	100	149	217	20,96	Berg-Ahorn	100
120	204	25,11	Berg-Ahorn	100	150	52	8,50	Spitz-Ahorn	200
121	377	26,37	Berg-Ahorn	100	151	72	9,50	Berg-Ulme	100
122	219	24,32	Berg-Ahorn	100	152	72	12,66	Spitz-Ahorn	100
123	42	4,13	Berg-Ulme	100	153	47	4,66	Buche	100
124	266	25,86	Berg-Ahorn	100	154	36	5,89	Buche	100
125	418	27,50	Winter-Linde	100	155	73	12,06	Spitz-Ahorn	200
126	147	17,74	Buche	100	156	19	2,30	Spitz-Ahorn	100
127	236	24,02	Buche	100	157	36	4,17	Winter-Linde	100

Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Senke* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
158	46	4,67	Winter-Linde	100	188	28	2,40	Buche	100
159	72	6,25	Sommer-Linde	100	189	58	7,61	Buche	100
160	34	4,75	Winter-Linde	100	190	227	25,36	Buche	100
161	165	18,40	Berg-Ahorn	100	191	172	25,17	Buche	100
162	24	2,30	Winter-Linde	100	192	51	2,50	Buche	200
163	40	5,88	Sommer-Linde	100	193	50	7,70	Buche	100
164	95	10,75	Winter-Linde	100	194	202	24,02	Buche	100
165	30	3,10	Winter-Linde	100	195	83	17,09	Buche	100
166	94	16,52	Berg-Ahorn	100	196	48	4,75	Buche	300
167	24	2,90	Winter-Linde	100	197	91	14,78	Buche	100
168	38	2,30	Winter-Linde	100	198	48	6,59	Buche	100
169	97	6,04	Sommer-Linde	100	199	69	8,96	Buche	100
170	25	1,90	Sommer-Linde	100	200	178	24,48	Buche	100
171	40	2,80	Sommer-Linde	100	201	191	25,90	Buche	100
172	62	4,26	Sommer-Linde	100	202	141	21,32	Berg-Ahorn	100
173	90	6,67	Sommer-Linde	100	203	362	28,24	Berg-Ahorn	100
174	367	25,43	Sommer-Linde	100	204	59	11,99	Buche	100
175	40	5,84	Sommer-Linde	100	205	60	9,81	Buche	100
176	95	15,52	Sommer-Linde	100	206	41	3,80	Buche	200
177	42	7,13	Sommer-Linde	100	207	47	5,21	Buche	200
178	92	9,80	Sommer-Linde	300	208	247	27,84	Buche	100
179	91	14,53	Buche	100	209	74	13,14	Buche	100
180	37	5,42	Buche	100	210	149	18,99	Buche	100
181	177	19,48	Buche	100	211	52	6,39	Buche	100
182	33	2,70	Buche	100	212	349	27,78	Berg-Ahorn	100
183	121	11,07	Sommer-Linde	100	213	238	27,27	Berg-Ahorn	100
184	35	3,50	Buche	100	214	124	12,81	Berg-Ahorn	300
185	20	2,40	Buche	100	215	42	4,89	Buche	100
186	50	3,40	Buche	300	216	54	8,53	Buche	100
187	44	7,69	Buche	100	217	277	22,75	Buche	100

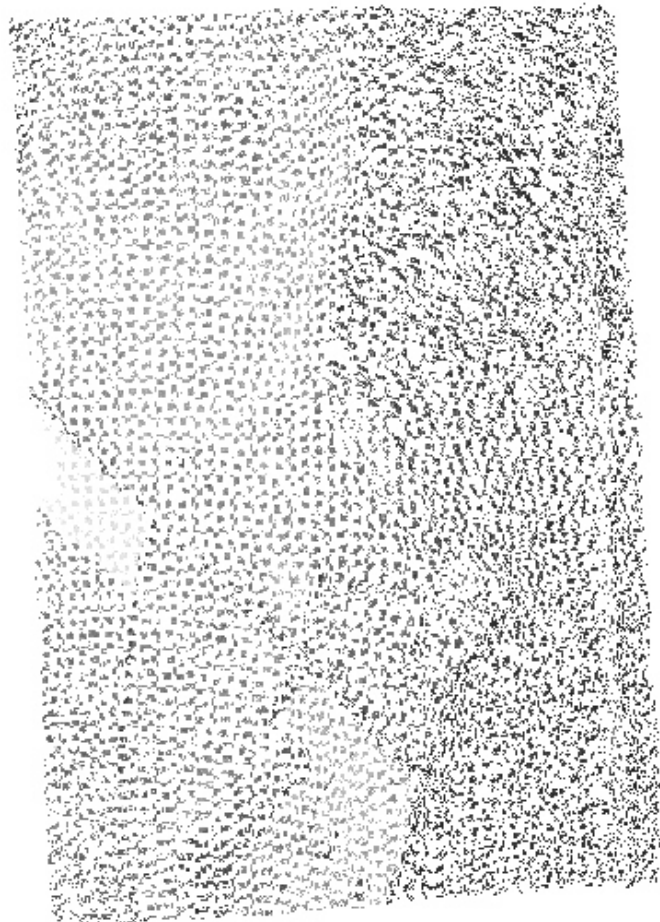
Fortsetzung Kluppliste Wiederholungsinventur *Senke* 2012

ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status	ID	BHD (mm)	Höhe (m)	Baumart	Status
218	99	10,33	Buche	300	247	218	23,32	Berg-Ahorn	100
219	134	21,24	Buche	100	248	51	3,85	Berg-Ulme	100
220	94	13,38	Buche	100	249	85	13,19	Buche	100
221	281	22,80	Buche	100	390	238	17,97	Berg-Ahorn	100
222	223	25,38	Buche	100	470	253	19,71	Sommer-Linde	100
223	166	22,42	Buche	100					
224	46	4,69	Buche	200					
225	248	20,96	Buche	100					
226	137	19,53	Buche	100					
227	40	4,97	Buche	100					
228	332	23,94	Winter-Linde	100					
229	42	7,11	Buche	100					
230	39	6,20	Buche	100					
231	42	2,69	Winter-Linde	100					
232	52	3,62	Winter-Linde	300					
233	75	10,84	Buche	100					
234	129	18,56	Buche	100					
235	334	23,45	Buche	100					
236	141	16,28	Buche	100					
237	26	4,20	Winter-Linde	100					
238	51	8,96	Sommer-Linde	100					
239	44	6,83	Sommer-Linde	100					
240	34	2,50	Sommer-Linde	100					
241	40	5,82	Sommer-Linde	100					
242	31	3,67	Sommer-Linde	100					
243	36	4,45	Sommer-Linde	100					
244	94	16,69	Sommer-Linde	100					
245	62	6,80	Sommer-Linde	100					
246	167	18,60	Sommer-Linde	100					

9.4-16 Auswertebereicht Berechnung Oberflächenmodell 1970 mit Agisoft Photoscan Professional

Agisoft PhotoScan

Verarbeitungsbericht
23 September 2016



Bezugsfläche

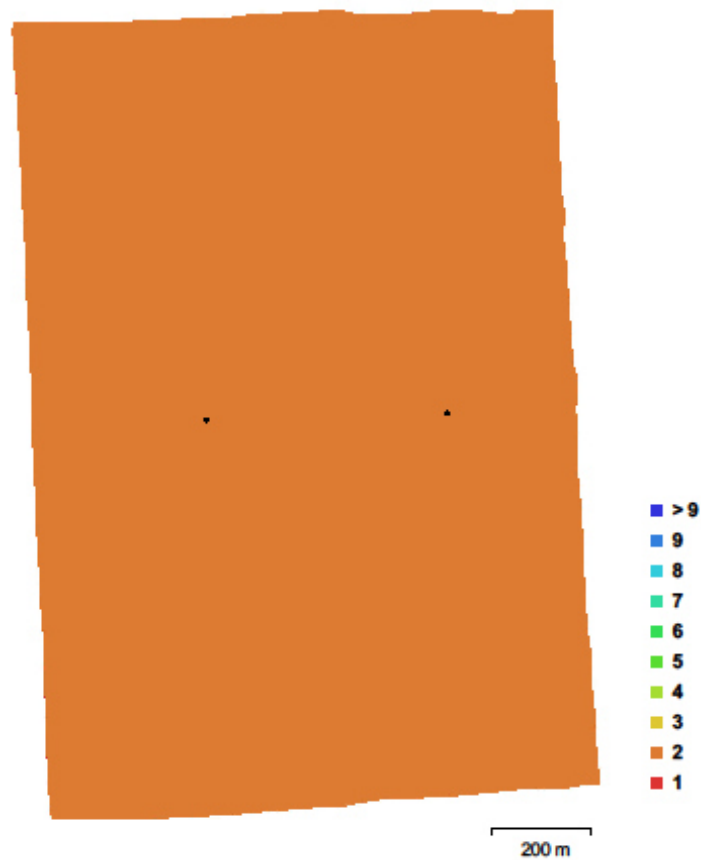


Fig. 1. Kamerapositionen und Bildüberlappung.

Anzahl der Bilder:	2	Kamerastationen:	2
Flughöhe:	2.16 km	Verknüpfungspunkte:	3,879
Bodenauflösung:	40.1 cm/pix	Projektionen:	7,758
Deckungsbereich:	1.74 km ²	Reprojektionsfehler:	0.869 pix

Kameramodell	Auflösung	Brennweite	Pixelgröße	Vorkalibriert
unknown	4042 x 4031	unbekannt	unbekannt	Nein
unknown	3737 x 3979	unbekannt	unbekannt	Nein

Tabelle 1. Kameras.

Kamera-Kalibrierung

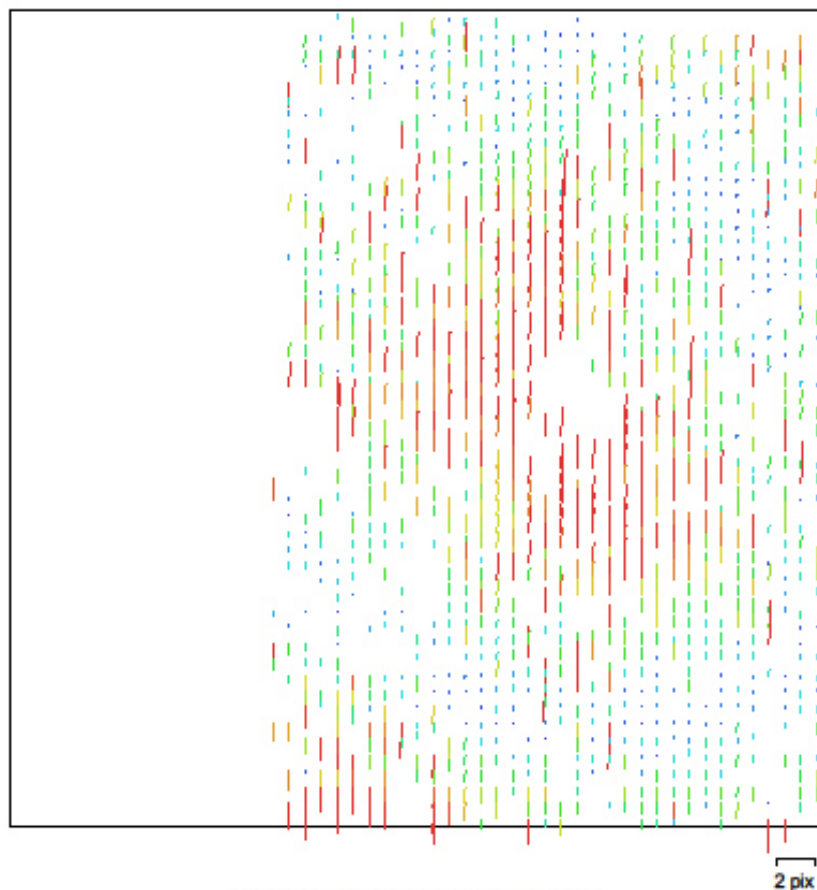


Fig. 2. Bildrestwerte für unknown.

unknown

1 Bilder

Auflösung 4042 x 4031	Brennweite unbekannt	Pixelgröße unbekannt	Vorkalibriert Nein
Typ:	Standard	F:	5229.33
Cx:	0	B1:	2.20158
Cy:	0	B2:	0
K1:	0	P1:	-0.00424981
K2:	0	P2:	-0.000711662
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Kamera-Kalibrierung

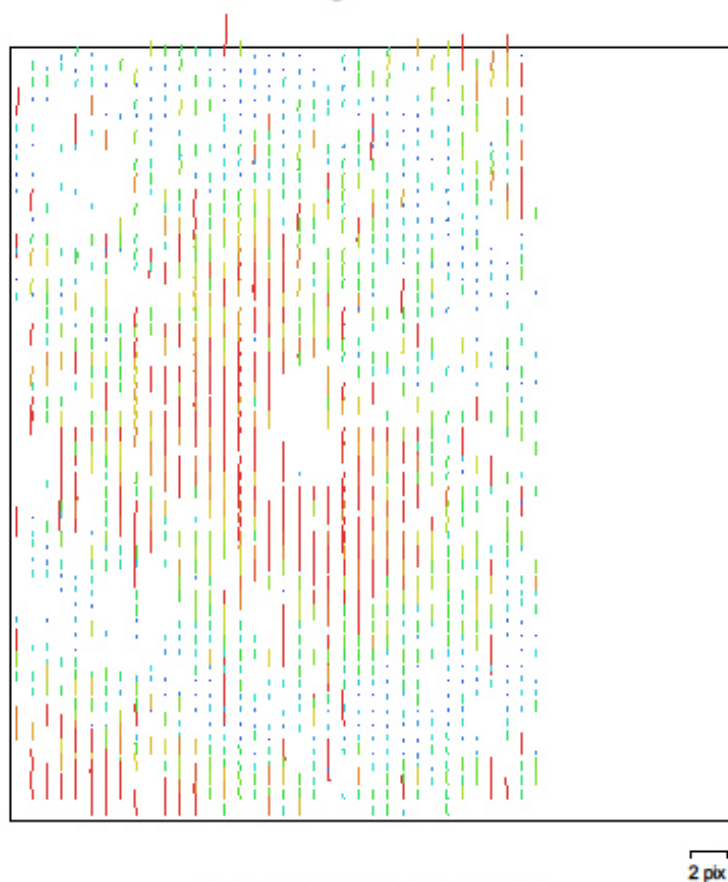


Fig. 3. Bildrestwerte für unknown.

unknown

1 Bilder

Auflösung 3737 x 3979	Brennweite unbekannt	Pixelgröße unbekannt	Vorkalibriert Nein
Typ:	Standard	F:	5131.5
Cx:	0	B1:	2.6788
Cy:	0	B2:	0
K1:	0	P1:	-0.0116026
K2:	0	P2:	-0.00516791
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Kamerapositionen

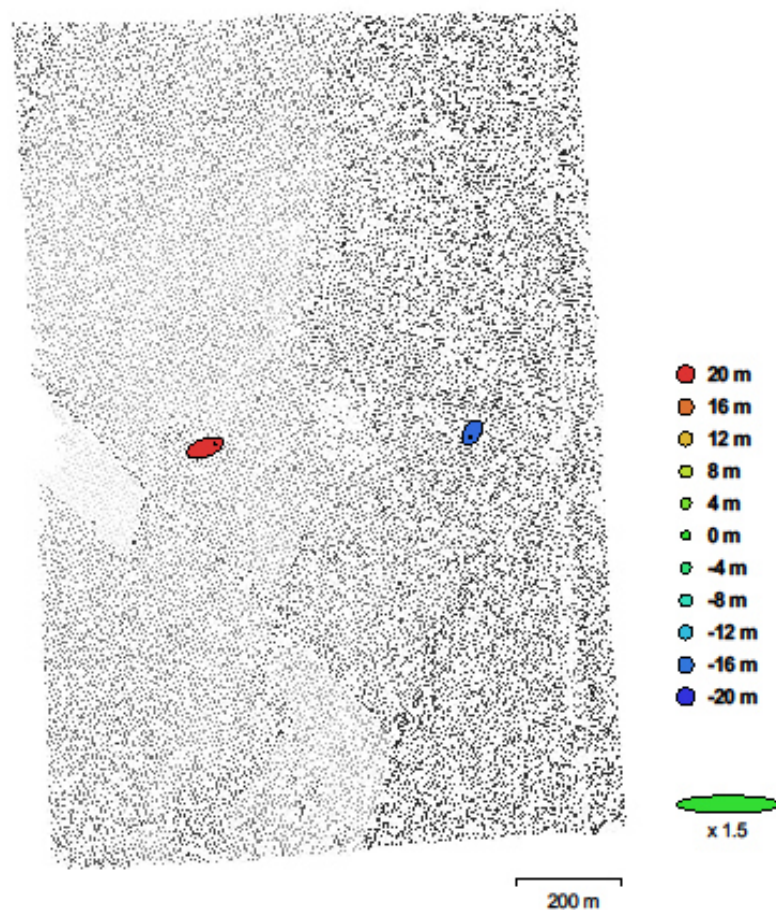


Fig. 4. Kamerapositionen und Fehlerabschätzung.

Z Fehler ist durch Ellipsenfarbe dargestellt. X, Y Fehler sind durch Ellipsenform dargestellt.

Geschätzte Kamerapositionen sind mit schwarzen Punkten markiert.

Fehler X (m)	Fehler Y (m)	Fehler Z (m)	XY Fehler (m)	Gesamtfehler (m)
17.4878	10.0243	18.4865	20.1571	27.3507

Tabelle 2. Durchschnittlicher Kamerapositions-Fehler.

Bodenkontrollpunkte

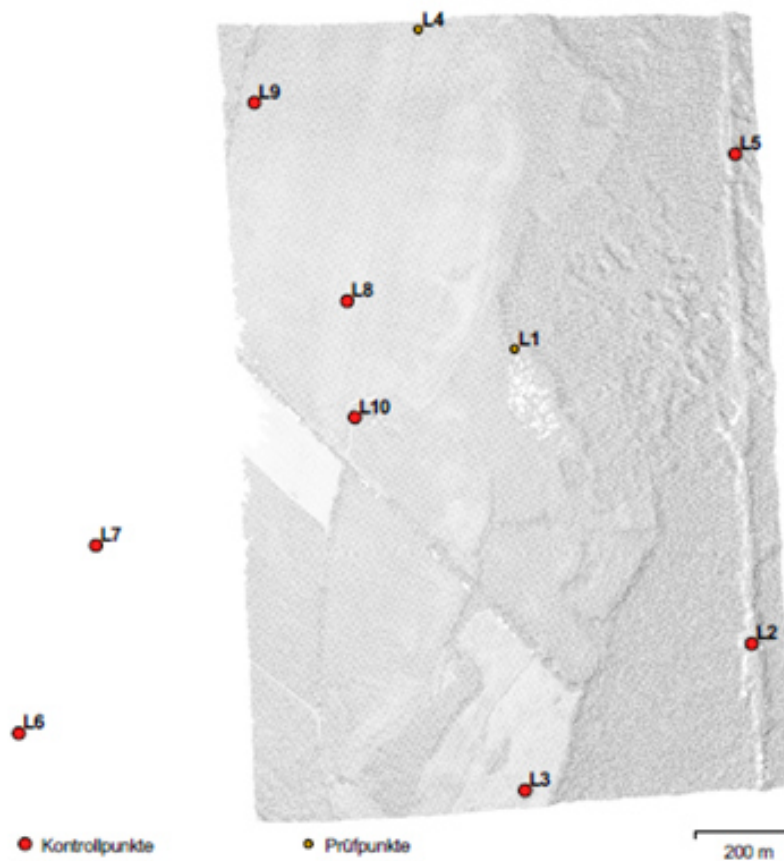


Fig. 5. Bodenkontrollpunktpositionen.

Anzahl	Fehler X (m)	Fehler Y (m)	Fehler Z (m)	XY Fehler (m)	Gesamt (m)	Bild (pix)
5	0.203093	0.25514	1.67799	0.326103	1.70938	0.368

Tabelle 3. Kontrollpunkte RMSE.

Verarbeitungsparameter

Allgemein	
Kameras	2
Ausgerichtet Kameras	2
Markierungen	10
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Punktwolke	
Punkte	3,879 von 4,000
Effektiver Reprojektionsfehler	0.229205 (0.869231 pix)
Max. Reprojektionsfehler	0.76161 (7.59811 pix)
Mittlere Schlüsselpunktgröße	4.76107 pix
Effektive Überlappung	2
Ausrichtungsparameter	
Genauigkeit	Hoch
Paar-Vorauswahl	Referenz
Schlüsselpunktilimit	40,000
Verknüpfungspunktilimit	4,000
Merkmale durch Maske beschränken	Nein
Zeit für Abgleich	4 Sekunden
Zeit für Ausrichtung	0 Sekunden
Optimierungsparameter	
Parameter	f, b1, p1, p2
Zeit für Optimierung	0 Sekunden
Dichte Punktwolke	
Punkte	637,974
Rekonstruktionsparameter	
Qualität	Mittel
Tiefenfilterung	Moderat
Zeit dichte Punktwolke generiert	0 Sekunden
DEM	
Größe	1,019 x 1,503
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Rekonstruktionsparameter	
Quelldaten	Dichte Punktwolke
Interpolation	An
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Plattform	Windows 64 bit

Agisoft PhotoScan

Verarbeitungsbericht
23 September 2016



Bezugsfläche



Fig. 1. Kamerapositionen und Bildüberlappung.

Anzahl der Bilder:	2	Kamerastationen:	2
Flughöhe:	3.08 km	Verknüpfungspunkte:	3,535
Bodenauflösung:	21.2 cm/pix	Projektionen:	7,070
Deckungsbereich:	2.59 km ²	Reprojektionsfehler:	1.24 pix

Kameramodell	Auflösung	Brennweite	Pixelgröße	Vorkalibriert
unknown	9374 x 10655	unbekannt	unbekannt	Nein
unknown	9933 x 10455	unbekannt	unbekannt	Nein

Tabelle 1. Kameras.

Kamera-Kalibrierung

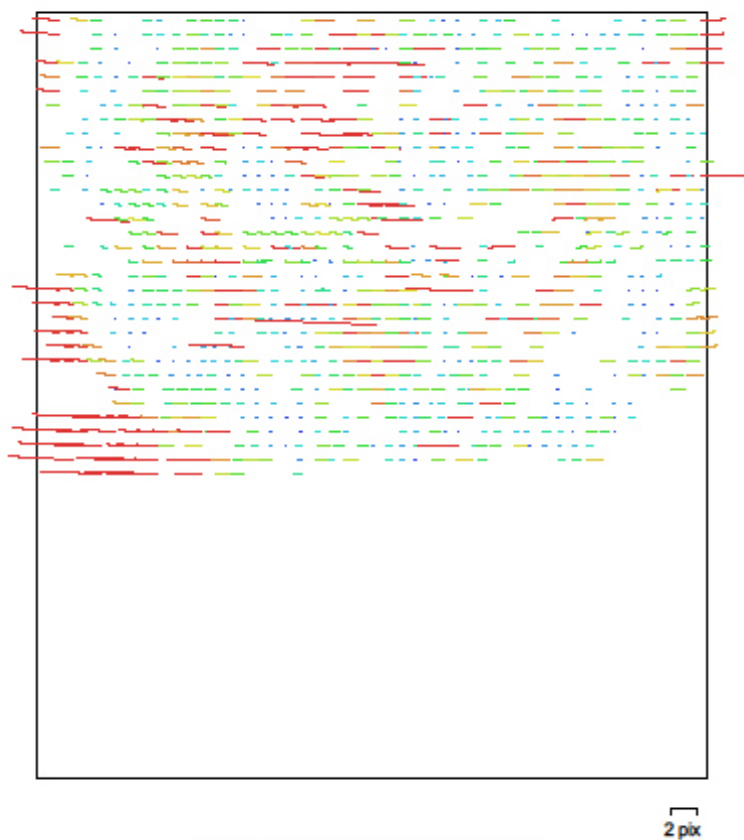


Fig. 2. Bildrestwerte für unknown.

unknown

1 Bilder

Auflösung 9374 x 10655	Brennweite unbekannt	Pixelgröße unbekannt	Vorkalibriert Nein
Typ:	Standard	F:	14364.2
Cx:	0	B1:	95.7093
Cy:	0	B2:	-55.0504
K1:	-0.0436571	P1:	0.0064664
K2:	0	P2:	-0.0136619
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Kamera-Kalibrierung

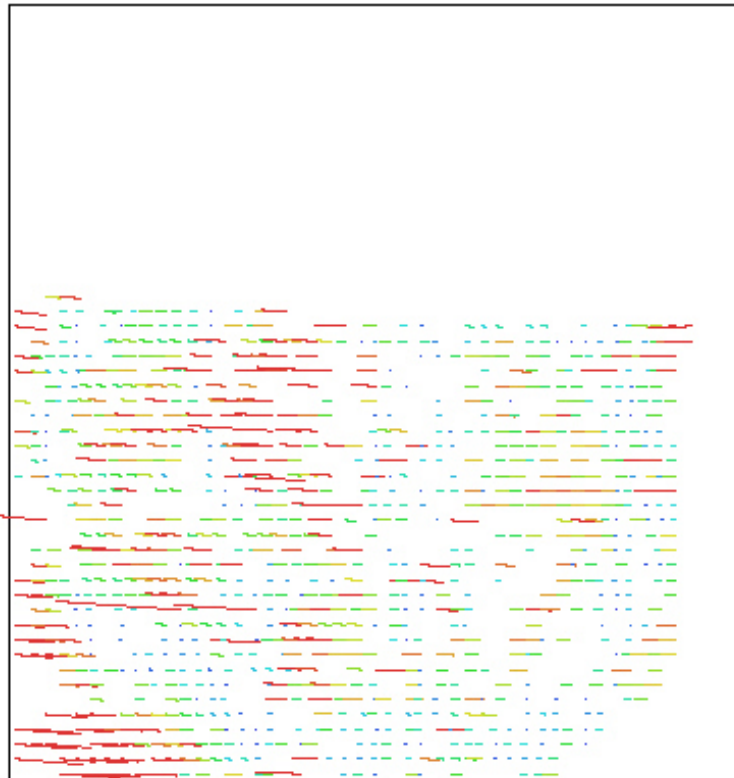


Fig. 3. Bildrestwerte für unknown.

2 pix

unknown

1 Bilder

Auflösung 9933 x 10455	Brennweite unbekannt	Pixelgröße unbekannt	Vorkalibriert Nein
Typ:	Standard	F:	13823.5
Cx:	0	B1:	0.220299
Cy:	0	B2:	-79.9433
K1:	-0.0604535	P1:	0.00543066
K2:	0	P2:	-0.00259586
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Kamerapositionen

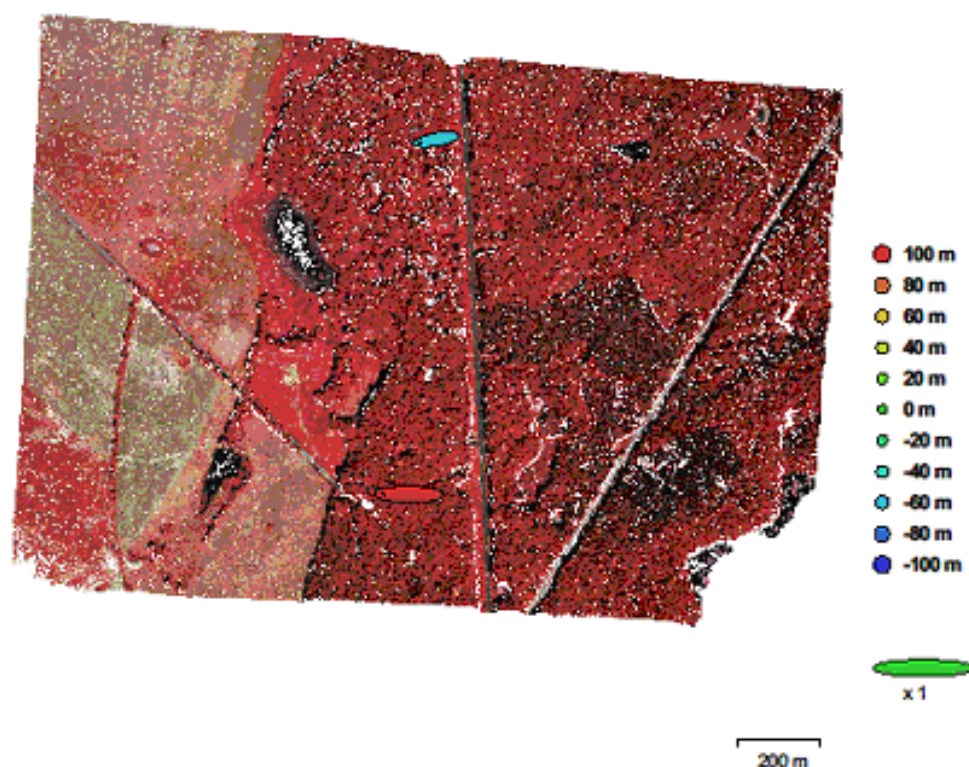


Fig. 4. Kamerapositionen und Fehlerabschätzung.

Z Fehler ist durch Ellipsenfarbe dargestellt. X, Y Fehler sind durch Ellipsenform dargestellt.
Geschätzte Kamerapositionen sind mit schwarzen Punkten markiert.

Fehler X (m)	Fehler Y (m)	Fehler Z (m)	XY Fehler (m)	Gesamtfehler (m)
101.104	10.6149	80.5828	101.66	129.724

Tabelle 2. Durchschnittlicher Kamerapositions-Fehler.

Bodenkontrollpunkte



Fig. 5. Bodenkontrollpunktpositionen.

Anzahl	Fehler X (cm)	Fehler Y (cm)	Fehler Z (cm)	XY Fehler (cm)	Gesamt (cm)	Bild (pbx)
6	12.4006	39.715	74.3493	41.606	85.1991	0.147

Tabelle 3. Kontrollpunkte RMSE.

Name	Fehler X (cm)	Fehler Y (cm)	Fehler Z (cm)	Gesamt (cm)	Bild (pbx)
L1	5.71643	10.9848	-23.7494	26.7839	0.019 (2)
L3	19.4425	30.0645	-34.2674	49.5595	0.046 (2)
L2	-7.95068	-9.58437	1.52395	12.5458	0.001 (2)
L4	9.43544	-8.6289	20.0677	23.7949	0.085 (2)
L5	-10.1862	52.5984	-106.875	119.552	0.296 (2)
L6	-15.9988	-74.2041	140.005	159.259	0.154 (2)
Gesamt	12.4006	39.715	74.3493	85.1991	0.147

Tabelle 4. Kontrollpunkte.

Digitales Höhenmodell

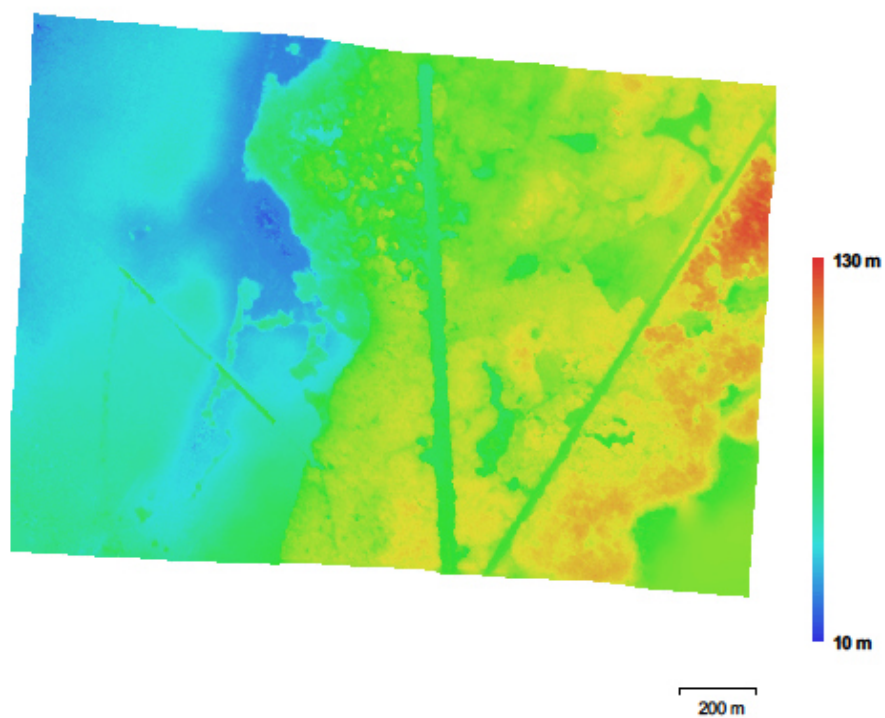


Fig. 6. Rekonstruiertes digitales Höhenmodell.

Auflösung: 84.9 cm/pix
Punktedichte: 1.39 Punkte/m²

Verarbeitungsparameter

Allgemein	
Kameras	2
Ausgerichtet Kameras	2
Markierungen	6
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Punktwolke	
Punkte	3,535 von 3,628
Effektiver Reprojektionsfehler	0.167524 (1.23965 pix)
Max. Reprojektionsfehler	0.559713 (12.9122 pix)
Mittlere Schlüsselpunktgröße	9.3054 pix
Effektive Überlappung	2
Ausrichtungsparameter	
Genauigkeit	Mittel
Paar-Vorauswahl	Referenz
Schlüsselpunktlimit	40,000
Verknüpfungspunktelimit	4,000
Merkmale durch Maske beschränken	Nein
Adaptive Kamera-Modellanpassung	Ja
Zeit für Abgleich	5 Sekunden
Zeit für Ausrichtung	0 Sekunden
Optimierungsparameter	
Parameter	f, b1, b2, k1, p1, p2
Zeit für Optimierung	0 Sekunden
Dichte Punktwolke	
Punkte	3,271,305
Rekonstruktionsparameter	
Qualität	Mittel
Tiefenfilterung	Aggressiv
Zeit Tiefenbilder generiert	10 Sekunden
Zeit dichte Punktwolke generiert	4 Sekunden
DEM	
Größe	3,363 x 2,453
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Rekonstruktionsparameter	
Quelldaten	Dichte Punktwolke
Interpolation	An
Verarbeitungszeit	3 Sekunden
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Plattform	Windows 64 bit